В. С. МАНЬКОВСКИЙ

ОСНОВЫ ЗВУКООПЕРАТОРСКОЙ РАБОТЫ

*Допущено Управлением кадров
и учебных заведений Госкино СССР
в качестве учебного пособия
для вузов кинематографии*



Москва «Искусство» 1985

ББК 37.95
М 24

Рецензенты: доктор технических наук, профессор *М. А. Сапожков* и звукорежиссер Ленинградской студии грамзаписи Всесоюзной фирмы «Мелодия» *В. Г. Динов*.

Маньковский В. С.

М 24 Основы звукооператорской работы: Учеб. пособие. — М.: Искусство, 1984. — 240 с., ил.

В книге изложены современные теоретические и экспериментальные данные, определяющие основные направления деятельности звукооператора при производстве фильма или при звукопередаче. Рассмотрены акустические характеристики различных источников звука, особенности звукопередающих систем, а также методы и приемы управления сигналами, позволяющие осуществлять передачи высокого качества. Книга иллюстрирована. Для студентов, звукорежиссеров, звукооператоров, инженеров звукозаписи, работников кино, ТВ и смежных областей.

М $\frac{4910030000-013}{025(01)-85}$ 118-84

ББК 37.95
778

От автора

Кино и телевидение родились и развиваются на базе известных научно-технических открытий. Соединение новых технических возможностей с некоторыми выразительными средствами театра — движением, действием — привело к появлению нового синтетического вида искусства. Этот синтез продолжается, так как изобразительный ряд воссоединился со звуковым. Следовательно, кино и телевидение нашли свое выражение в единстве искусства и научно-технических достижений с одной стороны и в единстве изобразительных и звуковых средств — с другой. Эти единства основаны на глубоких внутренних связях, и каждая составляющая не просто дополняет, а часто во много крат усиливает общий эффект, делая создаваемые звукозрительные образы более жизненными, а кино- и телевизионные произведения — высокохудожественными.

Таким образом, кино и телевидение, а в звуковой части и радиовещание возникли на границе двух разнохарактерных областей человеческой деятельности — искусства и техники. Это привело к тому, что часто одни и те же явления рассматриваются с разных позиций. Инженеры, например, больше интересуются физической стороной звуковых процессов, тогда как музыканты — только их результатами. Первые из них оценивают явление по объективным, вторые — по субъективным его данным. Следует думать, что такое различие в подходе будет в ближайшее время устранено. Новая область знаний, связанная с важной и необходимой деятельностью звукорежиссеров (звукооператоров), станет самостоятельной, творческие и технические категории найдут в ней полное единство.

Все сказанное определяет общие черты предлагаемого учебного курса. Так как основная цель звукорежиссера — осуществление высококачественной звукопередачи, которая может быть достигнута только в результате синтеза творческих и технических средств, то и курс должен быть также синтетическим. В нем должны найти отражение вопросы творческого и технического характера. Рассматривая акустические характеристики различных естественных источников звука, способы создания высокохудожественных звучаний, технические средства и условия передач, в нем определяются методы управления звуковыми сигналами, которые позволили бы с учетом особенностей слухового восприятия обеспечить максимально высокое качество передаваемых звучаний.

Таким образом, целью данного учебного пособия, так же как и одноименного курса, читаемого студентам звукооператорской специ-

ализации, является такое практическое преломление их знаний в области физической, физиологической и архитектурной акустики, звукотехники и электроакустической аппаратуры, которое позволило бы им усвоить основные методы и приемы управления звуковыми сигналами и правильно использовать богатейшие и разнообразные технические средства для достижения высокого художественного и технического качества звукопередач. Этому должна способствовать лабораторно-практическая часть курса, прививающая навыки по субъективной оценке качества звучания при изменении вида сигнала и его физических параметров.

Автор выражает большую благодарность доктору технических наук М. А. Сапожкову, кандидатам технических наук Б. А. Адаменко, Я. Ш. Вахитову, Ю. М. Ишуткину, Ф. В. Семякину за советы и замечания, высказанные ими при просмотре рукописи книги.

Глава 1.
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЗВУКОПЕРЕДАЧИ

1.1. Роль звука в кино, телевидении и радиовещании

Органы восприятия, и прежде всего органы зрения и слуха, позволяют человеку получить обширную информацию о явлениях, событиях и фактах, с которыми он сталкивается в жизни. Информация, основанная на жизненном опыте, вызывает определенные мысли и чувства, принимает семантическую и эстетическую форму. Все многообразие информации, принимаемой человеком, может быть им передано другим людям.

Стремление передать эту информацию в образном виде привело к рождению различных искусств, причем некоторые из них возникли как соединение нескольких способов образной передачи. Так, в драматическом искусстве соединилась информация, передаваемая речью и движением, в балетном — движением и музыкой, и т. д.

Такой синтез находит наиболее яркое выражение в художественных кино- и телефильмах, и не только потому, что в них используются многие виды передачи информации (изображение, движение, речь, музыка, шумы). Главное в том, как говорил А. Довженко, что кино теснейшим образом связано с действительностью, и в этом его могущество.

Звуки речи и музыки очень приближают к реальным образы, создаваемые в художественных фильмах. Речь в них раскрывает глубину мысли, характер героя, идейную направленность каждого фильма. Музыка стала выразителем чувств и настроения героев, фактором эмоционального воздействия на зрителей. Раздельное или совместное звучание речи, музыки, шумов образует единую звуковую картину, сливающуюся с изобразительным рядом фильма. Органическое единство изображения и звука, внешнего и внутреннего движения делает кинематографические образы исключительно выразительными, а события — реалистическими и яркими. Хотя изображение по сравнению со звуком — более эффективный носитель информации и в кинематографе ему отводится главная роль, однако оно не может обеспечить жизненную полноту создаваемого им образа. Образ должен быть одновременно и звуковым, он синтетичен.

Следует отметить, что некоторые из звукорежиссеров, говоря о телевидении, на первый план выдвигают звук. «В большинстве случаев, — указывают они, — изображение является только средством показа того, что нужно слышать... большую часть программной информации несет звук» [38]. Вероятно, здесь имеются в виду передачи рядовых программ документального, концертного и литературно-драматического типов.

В радиовещании роль звука еще более велика. Он является единственным источником информации и даже частично берет на себя функцию изображения. В литературно-драматических передачах по радио можно, например, с помощью звука создать представление о времени и месте действия, о движении исполнителей и даже об обстановке передаваемых событий.

Таким образом, значение звука в кино, телевидении и радиовещании очень велико. Более того, звуковая информация, осуществляемая с помощью технических средств, шире используется в искусстве, в науке и технике, в общественной и культурной жизни. Известно, например, что в настоящее время 93% всех музыкальных программ, принимаемых людьми, падает на передачи, осуществляемые звукопередающими системами. Из сказанного следует, что эти системы должны наилучшим образом передавать заложенные в звуках мысли и чувства, правильно отображать звуковые планы, создавать нужную звуковую обстановку.

В случае одновременного с изображением действия роль звуков заметно расширяется. Появляется необходимость добиваться полного соответствия звука со зрительным образом и ситуацией передаваемого эпизода. Должны воссоздаваться звуковые впечатления, связанные с изменением масштаба изображения и движением исполнителей, с изменением интерьера, вида звукового сигнала и характера драматического или музыкального произведения. Звук предназначается для повышения зрительной выразительности путем правильного и умелого сочетания изображения с речью, музыкой и шумами. Их общее эмоциональное воздействие на людей не складывается, а многократно усиливается, создавая незабываемые высокохудожественные образы.

1.2. Функции звукорежиссера (звукооператора)

Важное значение звука в создании звукозрительного образа в кинофильме или в художественной программе налагает на звукорежиссера (звукооператора) большую ответственность. Это находит свое выражение в тех обязанностях, которые сформулированы в должностных положениях. Они включают в себя подбор и специальную организацию звукового материала, соответствующего характеру кадра, сцены и общей идее фильма или художественной программы, а также обработку этого материала путем оперативного воздействия на отдельные элементы тракта звукозаписи, так, чтобы получить максимальную естественность звучания, связанную с полным использованием технических возможностей тракта и с доведением до слушателя художественного замысла композитора и исполнителей.

Из приведенной общей формулы следует, что основная цель звукорежиссера — осуществление звукопередачи на высоком техническом и художественном уровне. Она достигается путем управления рядом основных параметров передаваемых звуковых сигналов, таких, как уровень громкости, частотный спектр, направленные и

временные свойства. Управление может осуществляться как естественным образом, т. е. с помощью самих источников звука — на стадии создания исходных звучаний, так и искусственно — в процессе звукопередачи.

Первый из этих методов находит свое выражение в том, что под руководством режиссера, дирижера и звукорежиссера исполнители устанавливают такие соотношения звуковых параметров, при которых удается с максимальным приближением реализовать творческий замысел сценариста и композитора. Для такого управления используют выразительные средства речи и музыки, которые не могут быть строго конкретизированы. Поэтому процесс такого управления является чисто творческим.

Второй метод осуществляется с помощью технических средств и связан с изменением характеристик звукопередающей системы. Эти характеристики выражают конкретные физические закономерности и поддаются объективной количественной оценке. Управление техническими характеристиками необходимо для того, чтобы сделать незаметными искажения, которые могут вноситься системой в передаваемые сигналы, а также для повышения художественной выразительности звучаний. Следовательно, процесс управления в этом случае совмещает в себе функции творческого и технического характера.

Каждый из основных методов управления имеет ряд характерных для него практических способов и приемов, позволяющих наиболее эффективно изменять параметры звучания, добиваясь его высокого качества. Очевидно, такое изменение параметров должно осуществляться в соответствии с обстановкой, в которой развиваются действия исполнителей, и с учетом особенностей слухового восприятия.

Таким образом, основная задача звукорежиссера — управление звуковыми сигналами в процессе их создания и передачи. Для выполнения этой задачи звукорежиссер (звукооператор) должен быть хорошо подготовлен к решению творческих и технических вопросов, уметь анализировать, правильно и объективно оценивать качество передаваемых звучаний. Он должен разбираться в литературе, понимать музыку, творческий замысел режиссера, композитора, исполнителей, связь между звуковой и зрительной составляющими телевизионного или кинематографического произведения, а также современные тенденции развития техники и искусства звукопередачи. Он должен обладать серьезными знаниями по вопросам акустических свойств различных звуковых сигналов и выразительных средств художественных звучаний, качественных характеристик аппаратуры и возможностей ее управляемых элементов, приемов и методов управления акустическими параметрами звучаний. Он должен хорошо знать особенности слухового восприятия и акустические свойства ателье, студий, театров и концертных залов.

От звукорежиссера требуется умение: а) создавать оптимальные условия для передачи звучания различных источников звука; б) выбирать аппаратуру, с помощью которой можно наилучшим образом

решить данную задачу; в) правильно размещать аппаратуру соответственно условиям записи и технологическим требованиям; г) объективно оценивать качество звучания, хорошо распознавать искажения и устранять их; д) профессионально использовать разнообразные способы управления сигналами для повышения качества звучания и создания новых выразительных средств. Звукорежиссер должен знать, что́ надо делать для повышения качества передачи, как делать и почему именно так, а не иначе.

Требования, предъявляемые к звукорежиссеру, вытекающие из поставленных перед ним задач, указывают на необходимость его сотрудничества со специалистами смежных профессий.

Такое сотрудничество с режиссером фильма или программы необходимо для того, чтобы при составлении рабочего сценария и в процессе создания фильма добиваться включения в него только художественно оправданных звучаний, тесно связанных с изобразительным материалом. Сотрудничество с композитором и дирижером позволяет обеспечить единство музыки и характера изображаемой сцены, правильно выбрать соотношение уровней громкости для солистов и отдельных групп инструментов в оркестре, согласовать по времени звучание музыки с поведением действующих лиц. Сотрудничество с исполнителями обусловлено необходимостью оказания им помощи в выборе уровня громкости, темпа и динамики исполнения, устранения дефектов речи, особенно подчеркиваемых в процессе звукопередачи, определения возможных вариантов движения во время съемки изображения и т. д. Связь с кинооператором нужна для того, чтобы при разработке мизансцен решить вопрос о количестве одновременно используемых микрофонов, их размещении и передвижении, о характере акустической обработки декораций, а согласованном переходе от одного плана съемки и записи к другому.

Звукорежиссер должен быть связан с рядом производственных отделов и цехов студии. Так как для получения высококачественной фонограммы необходимо, чтобы запись звука ко всему фильму производилась на пленке, однотипной по своим техническим характеристикам, звукорежиссер должен быть связан с отделом пленки, который осуществляет хранение, отбор и технические ее испытания. Связь звукорежиссера с отделом декорационно-технических сооружений определяется необходимостью подвергать большие декорации дополнительной акустической обработке в том случае, когда их установка в павильоне или студии может заметно изменить акустические условия. Наиболее тесные и длительные взаимоотношения связывают звукорежиссера с цехом звукотехники. В подготовительный период работы он составляет и направляет в цех заявку на аппаратуру, определяющую тип стационарной и передвижной звукозаписывающей аппаратуры, типы микрофонов и дополнительного оборудования. В съемочный период эта связь выражается в том, что инженерно-технический персонал цеха осуществляет непосредственную запись звука, помогает звукорежиссеру в работе с микрофонами. С их участием в просмотровых залах цеха осуществляется

контроль качества записи и отбор полезного материала, а в монтажно-тонировочный период — перезапись всего звукового материала фильма. Подготовка этого материала для отбора и перезаписи связывает звукорежиссера с монтажным цехом.

1.3. Звуковое решение фильма в разработке автора, режиссера и звукорежиссера

Литературный сценарий — это художественное произведение, которое выражает собой полное, но достаточно обобщенное изобразительное и звуковое решение фильма. В нем сжато и образно показано развитие событий, определяющих идейное содержание фильма, описаны места действия и раскрыты характеры действующих лиц. В сценарии представлена и образно-звуковая линия фильма. Однако подробной разработки изобразительных и звуковых планов в нем нет. Так, например, в сценарии С. Эйзенштейна «Иван Грозный» картина венчания на царство дается в виде такого единого звукозрительного образа: «Под радостный звон колоколов. Под приветственные крики народа... осыпают молодого царя золотым дождем. Звонко льется золотой дождь» [10].

Звуковому решению фильма многие сценаристы придают большое значение. Например, Вс. Вишневский в одном из писем, дополняющих его сценарий «Мы из Кронштадта», писал режиссеру Е. Дзигану: «Все думаю о звуке, о звуковых лейтмотивах, об образе звука и звуковых образах... Звук должен быть органическим игровым компонентом. Он должен по-особому окрашивать действие, вторгаться в драматический элемент...» [6].

Начиная работать над фильмом, творческая группа должна превратить литературный сценарий в рабочий — *режиссерский сценарий*. В нем весь изобразительный материал будущего фильма делится по объектам съемки, а каждый объект — на сцены и кадры с описанием самих сцен, происходящих в них действий, характера декораций, способов и масштабов съемки. В этом сценарии дается и содержание всей звуковой части фильма. Речь расписывается по кадрам, к ним же относят и шумы с указанием их источника и характера. Со сценами изображения связываются тексты песен и музыка, указываются названия музыкальных произведений или характеры их звучания. В сценарий включаются пообъектные карты и звуковая экспликация, разрабатываемая звукорежиссером.

Звуковая экспликация фильма представляет собой программу действий звукорежиссера, составляемую обычно по произвольной форме, но с обязательным присутствием таких пунктов, как наименование объектов, содержание звукового кадра и его звукооператорская разработка. В последнем указываются все звуковые компоненты, их характер и последовательность, методы и приемы повышения качества звукопередачи. Так, в частности, содержание кадров по объекту «Поезд в горах» в сценарии фильма «Бег иноходца» представляется в таком виде: «Мчится по предгорью поезд. Солдаты возвращаются с победой. Гудят теплушки от песен и плясок. Стучат

колеса. Гремят оркестры». В звуковой же разработке есть, например, такие строки: «Из всех шумовых компонентов выбрать 2—3 наиболее ярких... Из гудков, применяя разноскоростную запись, составить мелодию торжества» [10].

Известно, что звуковую экспликацию или партитуру часто составляют режиссеры и для драматических спектаклей. Такая партитура, разработанная К. С. Станиславским для пьесы «Чайка», затрагивает, например, все ее акты. В ней... отдаленное пение загулявшего пьяницы... вой собаки... крик коростеля. Слышно, как «в доме играют самый пошлый, банальный вальс»... Слышен то стук сторожа, то вой ветра, то дребезжащий стук стекол, то финальный выстрел на фоне веселого «вполголоса пения Аркадиной»... [31]. Так драматургия театральная усиливается драматургией звука.

1.4. Обеспечение процесса записи и передачи звука

Обеспечение высокого качества звучания фильма или передачи осуществляется путем: а) выбора исполнителей по их сценическим и речевым данным; б) подбора или специального написания музыкальных произведений и определения коллектива музыкантов-исполнителей; в) отбора или записи шумов, включенных в звуковую экспликацию; г) отбора необходимой звуковой аппаратуры и условий проведения звукозаписи.

Выбор исполнителей обычно происходит после разыгрывания какой-либо сцены фильма каждым из претендентов на соответствующую роль. Последующий просмотр и прослушивание позволяют выбрать лучших исполнителей главных ролей.

Часто успех фильма во многом зависит от выбора основных исполнителей, от их способности создать яркие и правдивые образы героев. Разве может представить себе зритель Ивана Грозного, царя Петра или князя Меньшикова иными, чем видел их в фильмах в исполнении Н. Черкасова, Н. Симонова, М. Жарова. Или Чапаева, Щорса, Глинку иными, чем их показали в фильмах Б. Бабочкин, Е. Самойлов и А. Борисов. Или, наконец, принца Гамлета, не связывая имя этого литературного героя с образом, созданным И. Смоктуновским.

Для звукорежиссера в процессе отбора важно определить особенности голоса исполнителя, недостатки речевого или вокального исполнения, способность актера быстро исправить эти недостатки и приноровиться к условиям работы у микрофона. Пробы актеров и репетиции позволяют установить взаимопонимание, являющееся основой творческого содружества исполнителей и звукорежиссера.

Работа над речевым материалом фильма должна проходить одновременно с подбором и прослушиванием музыкальных произведений и шумов, входящих в фильм и имеющихся в фонотеке студии. Пригодность материала определяется путем его сопоставления с изобразительной тканью данной сцены, описанной в постановочном сценарии. Прослушивание новой, написанной для фильма музыки

позволяет звукорежиссеру найти правильные музыкальные акценты, увязать выразительные элементы музыки и изображения, согласовать их во времени.

Звукорежиссеру нужно позаботиться и о техническом обеспечении процесса записи или передачи звука. Для этого делается заявка на аппаратуру, магнитную ленту, на павильоны, ателье или студии, в которой указывается вид и количество необходимых технических средств, а также сроки их использования.

1.5. Факторы, определяющие качество звукопередач

Художественная ценность будущего кинематографического или литературно-драматического произведения определяется прежде всего исходными материалами, в которых находят выражение творческие замыслы авторов. Большое значение имеет глубина идейного содержания, правдивость мыслей и чувств, заложенных в данном произведении, тонкое и умелое использование возможностей реальных источников звука и выразительных средств речи и музыки. Все эти факторы предопределяют соотношения звуковых параметров сигналов, таких, как громкость и четкость, динамический диапазон, основная частота, формантный и спектральный состав звуков и их временны́е значения.

Большое влияние на качество звучаний, передаваемых электроакустической системой, оказывает ряд факторов, характеризующих первичные источники звуков. Их акустические параметры зависят от характера источников (голосовой аппарат, музыкальные инструменты, источники шумов), их типа (например, струнные, духовые, ударные инструменты) и вида (например, скрипка, виолончель, контрабас).

На качество звучания заметно влияют условия работы источников и приемников звука. Здесь имеется в виду общее число тех и других, их распределение по типам, видам и относительное размещение. Эти факторы способны как изменить параметры звучания, так и привнести ряд новых. В оркестре они позволяют сохранить правильное соотношение уровней громкости отдельных источников или их групп, которое принято называть *звуковым* или *музыкальным балансом.* Не менее важна и передача впечатления о размерах, *пространственности* всего звукового ансамбля, а также передача *звуковой прозрачности,* под которой понимают возможность выделить при прослушивании звучание отдельных источников или их групп на фоне звучания всего оркестра.

В группу факторов, имеющих отношение к акустике помещения, можно включить размеры и форму помещения, его акустическую отработку, а также размещение источников и приемников звука относительно ограничивающих помещение поверхностей. Эти факторы могут трансформировать параметры исходных звуковых сигналов, и особенно таких, как уровень громкости и тембр. Кроме того, они придают звучаниям новые свойства, которые воспринимаются

как реверберационная окраска, акустический баланс и звуковая перспектива. Под *акустическим балансом* понимают правильно выбранное отношение отраженной и прямой энергий, принимаемых в помещении звукоприемниками. Важный дополнительный параметр — временна́я структура первых отражений, несущая информацию о размерах помещения, из которого ведется передача.

Особую группу составляют факторы, относящиеся к электроакустическому тракту звукопередачи. Они связаны с техническими параметрами тракта, в частности с частотной и амплитудной его характеристиками. Первая из них определяет правильность передачи уровней частотных составляющих исходных сигналов. Вторая позволяет судить о величине новых частотных составляющих, могущих появиться в исходном сигнале под воздействием элементов этого тракта. Факторы этой группы способны изменить любой из акустических параметров исходного сигнала и внести как нежелательные искажения, так и изменения, повышающие качество звучания.

Известно, что слух воспринимает изменение силы и частоты звукового сигнала в своеобразном, почти логарифмическом масштабе. Он по-разному воспринимает одинаковые изменения и ряда других объективных параметров сигнала. Так, равные по объективной оценке частотные искажения воспринимаются слухом с различием в зависимости от того, к какой области частот они относятся. Заметность нелинейных искажений оказывается связанной не только с их величиной, но и с происхождением.

Таким образом, существуют многочисленные факторы психического, физиологического и технического характера, от которых зависит качество звучания. Это означает, что одни и те же качественные изменения сигнала могут быть обусловлены различными причинами, поиск которых делается затруднительным.

Глава 2.
АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАТУРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

2.1. Общие характеристики натуральных звучаний

Звуки окружающего нас мира, в отличие от искусственно созданных, называются *естественными* или *натуральными*. Соответствующие им сигналы представляются в виде случайных процессов, свойства которых определяются такими параметрами, как интенсивность, частотный состав, длительность и пространственность.

Интенсивность звуковых сигналов определяется как амплитудами всех частотных составляющих одного источника, так и числом различных источников, звучащих одновременно.

По *частотному признаку* звуковые сигналы можно разделить на *простые* и *сложные гармонические* (тоны и созвучия) и *шумы*. Сигналы простого гармонического типа, представляемые одной частотной составляющей, достаточно редки и встречаются только в голосах птиц и в «голосе» флейты. Созвучия в виде одного или нескольких одновременно звучащих сигналов состоят из ряда тонов и характеризуются дискретным частотным спектром. Звуки, издаваемые речевым аппаратом и большинством музыкальных инструментов, являются созвучиями. В том случае когда частотный спектр звукового сигнала из дискретного превращается в сплошной, соответствующие ему звуки называются *шумами*. В природе часто встречаются *широкополосные шумы*, создаваемые перемещающимися массами воды(шум водопада, прибоя) или воздуха (шум ветра), а также при игре на ударных и шумовых инструментах. *Узкополосные шумы* возникают частично при речеобразовании, пении, игре на некоторых музыкальных инструментах как шумы вдуваемого воздуха или движущихся частей этих инструментов (смычков, клапанов).

По *длительности* звуковые сигналы могут быть непрерывными и импульсными. К *непрерывным* относятся многие шумы (шум дождя, выходящего из трубы пара). Большинство звуковых сигналов, источниками которых служат речевой аппарат и музыкальные инструменты, в большей или меньшей мере являются *импульсными*. Для таких звуков существенно не только время звучания, но и временны́е изменения сигнала, которые зависят от типа источника звука, характера и темпа передаваемой информации.

Пространственность звучаний определяется положением источников звука относительно приемника и друг друга, их направленными свойствами, а также «акустической атмосферой» помещения, обусловленной разнообразием направлений прихода отраженных в нем сигналов.

В практике часто естественные звучания делят на группы не по акустическим, а по функциональным признакам на речевые, музыкальные и шумовые. К *речевым* относят звучания дикторской и художественной речи и пение. К *музыкальным* — звучания различных музыкальных инструментов (струнных, духовых, ударных). *К шумовым* же часто причисляют второплановые (иногда даже речевые или музыкальные) звучания, которые используются для усиления натуральности и выразительности зрительного эпизода. Они помогают определить место и время действия, создать иллюзию движения, раскрыть чувства и настроение героя.

Анализ программ Центрального радиовещания показывает, что речевые передачи занимают 26%, музыкальные — 23% и смешанные (речь, музыка, шумы) — 51% от всего времени передач.

2.2. Особенности речевых звучаний

Речевой аппарат человека имеет сложное устройство. Его голосовые связки под воздействием потока воздуха, идущего из легких, создают периодические колебания звуковой частоты. Увеличивая или уменьшая напряженность, длину и толщину связок, человек может влиять на частоту возбуждаемых колебаний. Так созданные колебания, проходя через изменяющиеся по форме и размерам полости рта, носа, носоглотки, преобразуются в элементарные сигналы.

В русском языке имеется несколько десятков простейших речевых сигналов — *фонем,* из которых складывается множество звуков, слогов, слов и фраз, определяющих все многообразие языка. Одни звуки речи, обозначаемые гласными и согласными буквами (*э, у, ш, г* и др.), состоят из одной, другие (*е, ё, ю, я*) — из двух фонем (*йэ, йо, йу, йа*).

Встречаемость различных звуков в русской речи очень неодинакова. Из гласных чаще всего встречаются *а, и, о,* из согласных — *н, т, с.* При этом вероятность появления в речи гласных *а, и* в 6÷10 раз больше, чем гласных *у, э,* а согласных *т, н* — в 10÷70 раз больше, чем *ч* или *ф.*

Таким образом, речевой аппарат является акустической системой, состоящей из звукообразующего элемента (голосовых связок) и ряда резонаторов с изменяющимися параметрами. Его упрощенная модель показана на рис. 2.1. Речь же, воспроизводимая этой системой, представляет собой крайне сложное явление. Речевые сигналы являются нерегулярными, и их особенности выражаются тремя видами характеристик. *Фонетические* характеристики определяют звуковой состав речи. Главная из них — частость встречаемости различных звуков и их

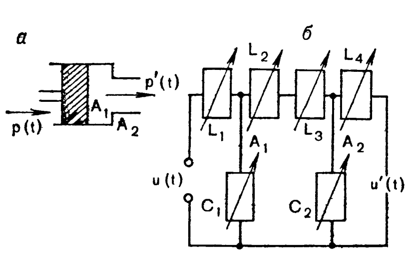


Рис. 2.1. Механическая (*а*) и электрическая (*б*) модели речевого аппарата

сочетаний. Фонетическая организация речи зависит также от ударных и безударных звуков, мелодических интонаций, временны́х и динамических характеристик речи. *Акустические* характеристики определяют такие чисто физические параметры речевых сигналов, как их мощность, динамический и частотный диапазоны, формантный состав, направленные свойства, длительность и др. *Информационные* характеристики позволяют разделить речевую информацию на сигнальную, семантическую и эстетическую. *Сигнальная* информация дает возможность опознать источник звука или определить направление на него (выкрик). *Семантическая* (смысловая) — передает содержание речи, заложенную в нее мысль. *Эстетическая* — отражает эмоциональные переживания говорящего человека.

Использование электрического тракта для передачи речевых сигналов часто приводит к заметной трансформации их акустических характеристик. Это не только снижает общее качество звучания, но и сказывается на фонетических характеристиках речи, изменяя характер мелодических интонаций и даже лексическое значение звука. Изменение акустических характеристик сигнала влияет и на информативные показатели речи, делая ее недостаточно разборчивой и мало выразительной. Все это заставляет прежде всего рассмотреть акустические характеристики речевых сигналов.

Мощность, динамический диапазон. Измерения показывают, что звуки речи очень отличаются по мощности. Так, для гласных звуков средняя мощность составляет 700 мкВт, тогда как для согласных она приближается к 0,7 мкВт. Такое большое различие в мощностях гласных и согласных (30 дБ) приводит к снижению разборчивости речи. Снижению способствует еще и то, что наибольшую смысловую информацию в речи несут слабые согласные звуки. Например, в слове «ракета» звуки *р, к, т* дают большее представление о его смысле, чем звуки *а, е, а.*

Средние мощности шепота, нормальной речи (при уровне интенсивности 50 дБ), крика и пения соответственно близки к 0,01; 10; 1000 и 5000 мкВт. Отсюда предельный динамический диапазон голоса составит 57 дБ, а диапазон нормальной речи — 30 дБ. Однако, учитывая практически редкое использование шепота, этот диапазон для нормальной речи составляет 25—30 дБ, а при пении (сопрано) около 45 дБ.

Спектры и частотный диапазон. Звучание человеческого голоса представляется в виде сигнала пилообразной формы, который кроме основной частоты содержит ряд гармонических составляющих. Наинизшая из основных частот у отдельных людей лежит в пределах 70—450 Гц, другие располагаются выше, в связи с чем основные частоты различных по типу голосов лежат в пределах: для баса 70÷400 Гц, баритона 110÷440 Гц, тенора 130÷590 Гц, контральто 175÷780 Гц, меццо-сопрано 220÷1050 Гц и сопрано 350÷1320 Гц.

При формировании звуков речи и пения, осуществляемом системой резонаторов речевого аппарата, подчеркиваются те или иные группы их гармонических составляющих. Таких спектральных мак-

симумов в звуке может быть четыре и больше, однако распознавание каждого звука связано с одним, двумя первыми усиленными участками спектра, которые называются *формантами.* На рис. 2.2 заштрихованными полосками показано частотное размещение формантных областей ряда звуков. Кривая *1* показывает относительное

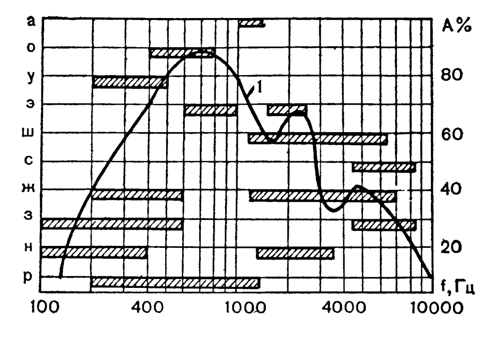


Рис. 2.2. Формантный состав некоторых звуков речи

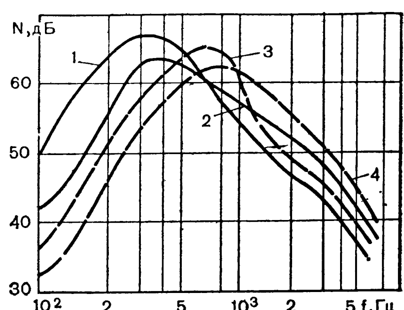


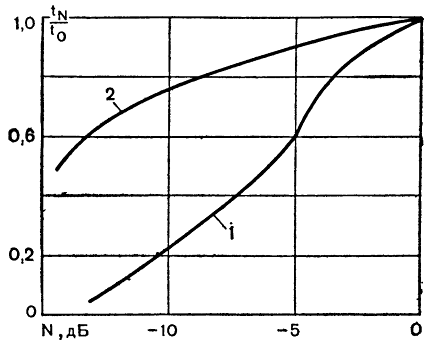
Рис. 2.3. Спектральные кривые для мужского (*1, 3*) и женского (*2, 4*) голосов в нормальном (*1, 2*) и усиленном (*3, 4*) режимах

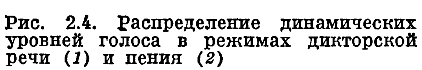
содержание формант (*A* %) в различных областях частотного диапазона. Как видно из рис. 2.2, форманты лежат в области частот от 100 до 8000 Гц, концентрируясь в пределах 200÷3000 Гц. Для гласных звуков характерны форманты с дискретным спектром для согласных, и особенно глухих *с, ш, х* — форманты со сплошным спектром. Большую роль играет певческая форманта (2200÷3200 Гц), характерная для хорошо натренированного голоса. Размещение этой форманты в области наивысшей чувствительности слуха обеспечивает повышенную громкость или «носкость» голоса.

Основные тона вместе с гармоническими составляющими, формантными и неформантными областями усиления создают полный спектр речевого сигнала. Такие спектры для мужского и женского голосов показаны на рис. 2.3 (кривые *1, 2*). Максимальные мощности для обоих голосов сосредоточены соответственно вблизи частоты 300 и 500 Гц, причем содержание низких частот в спектре мужского больше, чем в спектре женского голоса. При усилении этих голосов на 15 дБ (кривые *3, 4*) содержание низкочастотных составляющих в спектрах заметно понижается при одновременном увеличении высокочастотных составляющих. С учетом такого изменения спектра частотный диапазон для мужского голоса лежит в границах 70÷6000 Гц, а для женского — в границах 150÷9000 Гц.

Временные характеристики. Длительность формант гласных звуков и таких согласных, как *л, м, н, р,* больше, чем у согласных звонких и глухих. Средняя длительность гласных составляет 150 мс с колебанием в пределах от 120 мс (для неударных) до 210 мс (для ударных звуков). Для согласных пределы изменения длительности звуков еще больше и составляют 140÷300 мс.

Слоги соединяются в слова при помощи словесных ударений. Единство слов в фразе достигается также ударением, сделанным на последнем слове. Эти факторы, а также наличие пауз между словами и фразами определяют временну́ю структуру речевых сигналов.




Рис. 2.4. Распределение динамических уровней голоса в режимах дикторской речи (*1*) и пения (*2*)

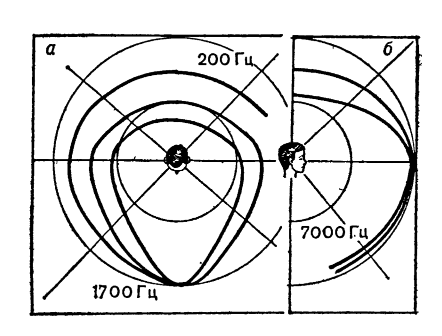


Рис. 2.5. Характеристики направленности речевого аппарата

Темп произношения слов и длительность пауз зависят от особенностей языка, типа передачи и индивидуальных данных исполнителя. На общем темпе сказывается и то, что в помещении каждая пауза сопровождается затуханием одного сигнала и нарастанием следующего. Семантические паузы в программе Центрального радиовещания занимают около 5% общего времени передачи. Длительность же их очень неодинакова. Паузы в 50÷150 мс составляют 44%, а до 300 мс — 15% от их общей долготы.

Зависимости уровня текущей мощности $N(t) = 10 \lg \frac{P(t)}{P_{макс}}$ от доли времени $\frac{t_N}{t_0}$, которая приходится на звучание данного уровня для дикторской речи и пения (кривые *1, 2* на рис. 2.4), показывают, что при дикторском чтении доля времени, приходящаяся на тихие звучания, например с уровнем 15 дБ, в 4÷5 раз меньше, чем при пении. Это означает, что речевые сигналы в режиме пения во времени более динамичны.

Пространственные характеристики. Дифракция звука вокруг головы заметно сказывается на характеристиках направленности человеческого голоса. Это подтверждается кривыми, построенными в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рис. 2.5, *а* и *б*). Изменение горизонтального угла приема в пределах ±45° и дальше до ±90° приводит к относительному уменьшению уровня высокочастотных составляющих сигнала соответственно на 3÷5 и 6÷8 дБ. Несколько меньше на передачу высокочастотных составляющих речевого сигнала влияет изменение угла в вертикальной плоскости (рис. 2.5, *б*). Кроме того, в этом случае относительное изменение уровней высокочастотных сигналов при одинаковом изменении уг-

ла в положительном направлении заметно больше, чем в отрицательном. Частотный спектр сигнала в различных направлениях от его источника претерпевает изменение, связанное со все более заметным уменьшением уровня гармонических составляющих по мере повышения их частоты.

Таким образом, речевой аппарат, будучи сложной системой, определяет не только громкость, тональность, тембр речевого звучания, но и сильно влияет на фонетические и информационные его показатели.

2.3. Акустические характеристики струнных музыкальных инструментов

Струнные музыкальные инструменты представляют собой акустические системы, в которых звукообразующими элементами (вибраторами) являются туго натянутые струны, а резонаторами — деки и объем корпуса инструмента. По методу возбуждения вибраторов они делятся на *смычковые* (скрипка, виолончель и др.), *щипковые* (арфа, гитара и др.) и *ударные* (фортепьяно и др.).

Смычковые инструменты. Эти инструменты обладают средней мощностью. Для скрипки она изменяется от 0,06 до 900 мкВт. Максимальный уровень звукового сигнала этого инструмента достигает 75 дБ, а минимальный — 35 дБ. Отсюда динамический диапазон его составляет 40 дБ. Наименьший диапазон из инструментов этой группы имеет контрабас, для которого он равен 35 дБ.

Как известно, решение уравнения одномерной колебательной системы (струны) имеет вид:

$$\xi = \sum_n \xi_n \sin \frac{\omega_n}{c} x \sin \omega_n t. \qquad (2.1)$$

Из него следует, что колебания струны складываются из суммы n гармонических колебаний, амплитуды $\xi_n \sin \frac{\omega_n}{c} x$ которых в направлении длины струны изменяются по закону стоячей волны. Частоты этих колебаний

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{\tau}{m}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{4\tau}{\pi d^2 \rho}} = \frac{n}{ld} \sqrt{\frac{\tau}{\pi\rho}} \qquad (2.2)$$

зависят от плотности материала — ρ, длины — l, диаметра — d и силы натяжения — τ струны. Путем подбора этих параметров каждую из четырех струн скрипки настраивают соответственно на частоты 196, 294, 440 и 659 Гц. Кроме того, уменьшение длины струны путем прижатия ее к грифу позволяет получить более высокие основные тона. В результате этого все они располагаются в частотной области от 196 до 4200 Гц, а вместе с гармоническими составляющими частотный диапазон скрипки расширяется, как это видно из рис. 2.6, до 8000÷10 000 Гц. При возбуждении струн смычком создаются пилообразные колебания почти постоянной

амплитуды, происходит перераспределение амплитуд и частот, составляющих звучание.

Воздействие резонатора сказывается в подчеркивании некоторых частотных областей. Эти области (форманты) для скрипки лежат вблизи частот 400, 800 и в полосах 2000÷2600 и 3000÷4000 Гц. По мере смещения главной форманты к частоте 4000 Гц качество

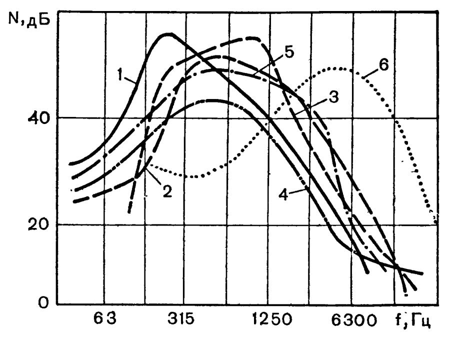


Рис. 2.6. Обобщенные спектральные кривые звучания контрабаса (*1*), виолончели (*2*), скрипки (*3*), арфы (*4*), фортепиано (*5*), челесты (*6*)

Рис. 2.7. Спектры первых струн скрипки (*1*, *1′*)и виолончели (*2*, *2′*)

звучания скрипки возрастает до наивысшего. Все это приводит к усложнению частотных спектров струн скрипки (рис. 2.7), с чем связаны богатство тембра, певучесть и звучность этого инструмента.

Основные частоты альта и виолончели соответственно ниже скрипичных на квинту и на октаву с квинтой, в связи с чем для первого из инструментов равны 131, 196, 294 и 440 Гц, а для второго — 65, 98, 147 и 220 Гц. При сравнении огибающих частотных спектров, струн скрипки и виолончели (см. рис. 2.7) обнаруживается, что последние из них более спокойны. Однако и они имеют формантные выбросы и в области частот 250÷300, 400÷500 и 1500 Гц. Общие частотные диапазоны альта и виолончели укладываются в пределах 131÷9000 и 65÷8000 Гц (см. рис. 2.6). В отличие от них основные частоты контрабаса еще более смещены в низкочастотную область и равны 41, 56, 73 и 98 Гц. Звучание этого инструмента богато обертонами в низкочастотной области и сравнительно бедно — в высокочастотной. Форманты лежат в полосах 70÷250 и 400÷500 Гц, а полный диапазон занимает область от 41 до 5000 Гц.

Длительность непрерывного звучания струн, возбуждаемых движением смычка, зависит от характера музыкального произведения и метода звукоизвлечения. Так, при игре «легато» эта длительность может достигать 3÷5 с, тогда как при игре «пиццикато» создается пульсирующее звучание с длительностью отдельных импульсов около 0,2 с. Разнообразие методов звукоизвлечения заметно влияет и на время возникновения (атаки) звуков смычковых инструментов, которое изменяется в пределах 15÷500 мс. Интересно, что тембр звучания скрипки определяется не только составом обертонов, но

еще и тем, что во время атаки наиболее высокие из них (*5*, *4*) и вслед за ними низкие (*3*, *2*) заметно опережают звучание основного тона (рис. 2.8).

Для смычковых инструментов характерна ярко выраженная неравномерность пространственного распределения излучаемой ими энергии. В направлении, совпадающем с нормалью к резонаторным

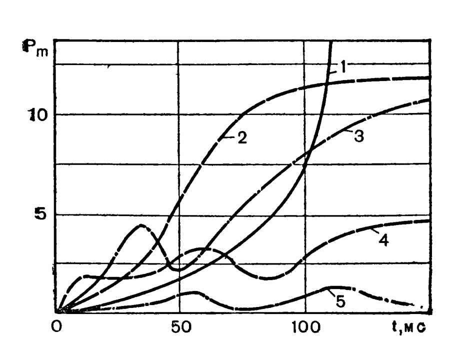


Рис. 2.8. Опережающее возникновение обертонов скрипки. Основной тон (*1*) — f_1=435 Гц.

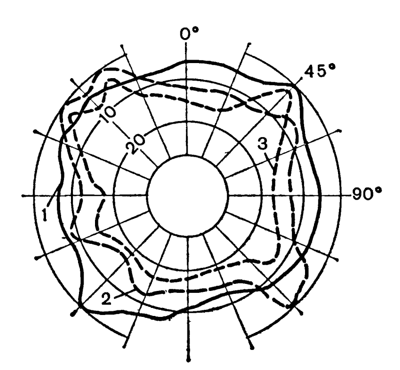


Рис. 2.9. Характеристики направленности звучания скрипки при частоте основного тона 500 Гц (*1*), 2000 Гц (*2*) и 4000 Гц (*3*)

отверстиям деки (эфы), уровень сигнала наибольший. При изменении же угла вправо и влево от нормали уровень сигнала заметно падает. Степень падения, как видно из характеристик направленности скрипки (рис. 2.9), зависит от частоты сигнала и маскирующего влияния тела исполнителя. Очевидно, направленные свойства альта, виолончели и особенно контрабаса будут менее ярко выраженными, так как их частотные спектры значительно смещены в сторону низких частот.

Щипковые инструменты делят на группы *грифовых* и *безгрифовых*. У инструментов первой группы (гитара, мандолина и др.) каждая струна в зажатом состоянии создает ряд основных тонов, а все струны (3÷7) вместе обеспечивают достаточно широкий частотный диапазон. К второй группе относятся инструменты, струны которых не изменяются по длине в процессе игры (арфа, цитра), поэтому для создания звучаний в широком частотном диапазоне число струн у них должно быть бóльшим.

Струны инструментов этого типа при возбуждении их щипком совершают собственные затухающие колебания. Мощность таких колебаний невелика, а уровни тихих и громких звучаний равны 42 и 56 дБ. Вот почему динамический диапазон этих инструментов не превышает 20 дБ. Особенно он мал у арфы, для которой используются струны малой массы и резонатор небольших размеров.

Струны гитары настраивают на частоты 73, 98, 124, 146, 196, 246, 294 Гц. Путем укорочения их можно получить ряд основных тонов до 1200 Гц. Общий же частотный диапазон с обертонами имеет

для гитары (рис. 2.10) границы у частот 70 и 9000 Гц, причем число формант, расположенных в области низких и средних частот, невелико. Основная из них совпадает с резонансной частотой объема V воздуха в корпусе. Рассматривая корпус, как резонатор Гельм-

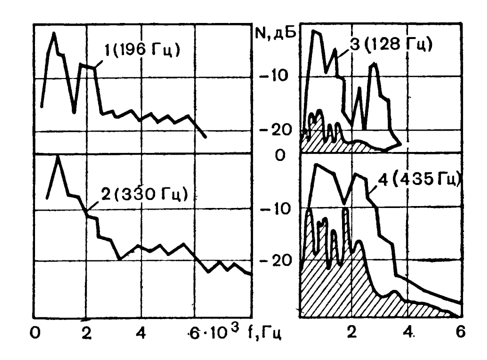


Рис. 2.10. Спектры звучания струн гитары (*1, 2*) и банджо (*3, 4*)

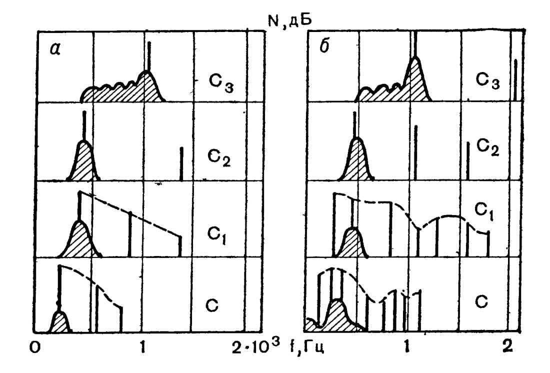


Рис. 2.11. Спектры звучания струн арфы при щипке на ½ (*а*) и ⅓ (*б*) их длины

гольца без горловины, эту частоту можно определить по известной формуле:

$$f_p = \frac{c_0}{2\pi}\sqrt{\frac{2\pi r^2}{V(2h+\pi r)}} = 136\sqrt{\frac{r^2}{V(2h+\pi r)}}, \qquad (2.3)$$

где r — радиус отверстия резонатора, м; h — толщина деки, мм; c_0 — скорость распространения звука в воздухе, м/с.

Различие в характере щипка (мякотью пальцев, ногтями или медиатором) приводит к изменению частотного состава звучания. При щипке с помощью ногтей или медиатора атака получается более жесткой, а звуковой сигнал приобретает дополнительное число гармонических составляющих. Как видно из сравнения огибающих спектров струн банджо, возбуждаемых медиатором, и струн гита-

ры, возбуждаемых мякотью пальцев (рис. 2.10), в первом случае не только увеличивается содержание обертонов, но и появляются шумовые призвуки (заштрихованная зона). Влияние выбора точки приложения силы очень заметно на примере арфы. На рис. 2.11 показаны спектры ее струн C (131 Гц), C_1 (262 Гц), C_2 (523 Гц) и C_3 (1047 Гц) при возбуждении их на середине (*а*) и на $^1/_3$ длины (*б*). В первом случае с пучностью смещения основной частоты совпадают пучности нечетных гармонических составляющих, имеющих сравнительно малые амплитуды, тогда как во втором — такое совпадение имеет место для четных более сильных и ярких гармоник, что заметно обогащает спектр. Вообще же амплитуды гармонических составляющих звучания арфы малы, потому что резонатор работает малоэффективно. Ее единственная форманта вблизи частоты 250 Гц заметно маскируется шумами. Из рис. 2.6. следует, что излучаемая арфой энергия сосредоточивается в области 100÷1250 Гц, а ее общий частотный диапазон укладывается в пределах 36÷15 000 Гц.

Щипковые инструменты создают ряд импульсных свободно затухающих сигналов, следующих друг за другом. Время нарастания сигнала невелико, оно, как и время затухания, зависит от силы щипка, толщины и длины струны. Уменьшение этих параметров сокращает время послезвучания, что особенно характерно для звуков высокого регистра.

Струнные ударные инструменты. Наиболее часто используемый инструмент с ударным методом возбуждения струн — фортепиано. Будучи безгрифовым, этот инструмент для создания широкого звукоряда должен иметь большое количество струн.

Сила звука струн невелика и все уменьшается по мере повышения частоты собственных колебаний. Чтобы выравнить интенсивность звука по всему частотному диапазону, звуковые колебания первых 10÷12 низких тонов создаются одиночными струнами, следующие 14÷16 — двойными, а все остальные — тройными в унисон настроенными струнами. Для усиления сигналов под струнами размещается резонансная дека, обладающая большим числом собственных частот. Эти меры, а также большая масса низкочастотных струн позволяют при большой силе удара повысить уровни тонов с частотами ниже 500÷600 Гц до 80÷85 дБ (*ff*), тогда как наименьший уровень, характерный для высокочастотных тонов, не превышает 35÷37 дБ (*pp*). Следовательно, динамический диапазон этого инструмента достигает 45÷50 дБ. Такого широкого диапазона не имеет ни один из существующих музыкальных инструментов.

Фортепиано позволяет извлекать 88 основных тонов. Самый низкий из них имеет частоту 27,5 Гц (*ля* субконтроктавы). Частоты всех последующих звуков увеличиваются в 1,059 (на полтона) или в 1,122 (на тон) раза. Учитывая это, самый высокий из основных звуков имеет частоту 4186 Гц (*до* пятой октавы). Частоты и амплитуды гармонических составляющих, так же как и основных тонов, зависят от материала и размеров струн и силы их натяжения, места, длительности и силы удара молоточков по струне. Наиболь-

шее число этих составляющих сосредоточивается в области низких частот и усиливается резонатором особенно в пределах 100÷1200 Гц. Это видно по кривой *5* рис. 2.6, которая позволяет считать, что частотный диапазон фортепиано лежит в интервале частот 28÷6000 Гц.

Временные процессы для фортепиано имеют важное значение. Нарастание уровня звука при ударе молоточка по струне и почти сразу же следующее за ним затухание влияют на изменение частотного состава звучания и придают ему новые качественные особенности. Так, короткое время нарастания, равное примерно 10 мс для высокочастотных и 20 мс для низкочастотных сигналов, обеспечивает большую четкость и разделимость отдельных тонов в музыкальных пассажах. Длительный процесс затухания, достигающий из-за большой массы струны многих секунд, делает звучание фортепиано близким по мелодичности к стационарному звучанию скрипки. Учитывая, что быстрее всего затухают слабые высокочастотные составляющие, обогащенный обертонами сигнал к концу процесса принимает вид гармонического. Время послезвучания можно регулировать с помощью педали.

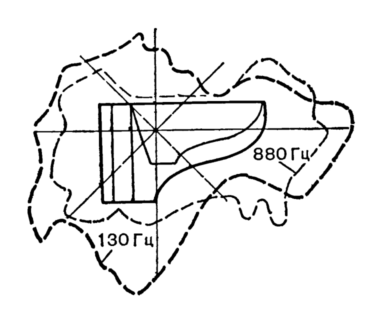


Рис. 2.12. Характеристики направленности фортепиано

Особое расположение струн и деки, форма корпуса фортепиано, наличие верхней крышки, отражающей звуковые волны, придают его характеристикам направленности специфический вид. Как следует из рис. 2.12, на котором показаны эти характеристики для сигналов с основными частотами 130 Гц (*до* малой октавы) и 880 Гц (*ля* второй октавы), их интенсивности, будучи максимальными в направлении клавиатуры и узкого закругленного конца инструмента, распределяются крайне неравномерно. Эта неравномерность зависит от частоты основного сигнала.

2.4. Акустические характеристики духовых музыкальных инструментов

В духовых инструментах звукообразующим элементом является объем воздуха, заключенного в трубе и совершающего колебания под воздействием воздушной струи, вдуваемой через отверстие. Усиление потока вдуваемого воздуха (передувание) вызывает повышение частоты колебаний. Изменить частоту сигнала можно еще путем изменения мензуры — отношения диаметра трубы к ее длине. У флейты это достигается изменением ее эффективной длины путем открытия и закрытия боковых отверстий, у органа же — сменой труб, различающихся по длине или диаметру. По способу возбуждения духовые инструменты делят на три группы.

Дульцевые (лабиальные), в которых возбуждение звуковых колебаний происходит при ударе вдуваемого потока воздуха о края отверстия, имеющегося в трубе (флейты, органные трубы).

Язычковые (тростевые), звук в которых возбуждается благодаря периодическому колебанию одной-двух пластинок, перекрывающих отверстие для вдувания воздуха (кларнет, гобой и др.).

Язычковые с амбушюром, в которых роль пластинок выполняют губы исполнителя, прижатые к мундштуку (труба, валторна и др.).

Как известно, в трубе при передувании возникает ряд стоячих волн с пучностями колебательной скорости в ее начале. Если труба закрытая, то в конце всегда будут узлы колебательной скорости, если открытая, то пучности. Это возможно только когда на длине трубы l укладывается соответственно нечетное или четное число четвертей длины волны λ_n, т. е. при

$$l = (2n-1)\frac{\lambda_n}{4} \text{ и } f_n = (2n-1)\frac{c_0}{4l} = (2n-1)f_1, \quad (2.4)$$

$$l = 2n\frac{\lambda_n}{4} \text{ и } f_n = n\frac{c_0}{2l} = nf_1. \quad (2.5)$$

Дульцевые инструменты. Флейты и некоторые из труб органа относятся к группе открытых труб этого типа. Как видно из равенства (2.5), их основной тон будет в два раза (на октаву) выше, чем у закрытых труб такой же длины, а возникающие обертоны будут как четными, так и нечетными.

Уровни наименьших и наибольших сигналов большой флейты на средних частотах составляют соответственно 50 дБ (*pp*) и 85 дБ (*ff*). Следовательно, в этой области частот динамический диапазон флейты равен 35 дБ, а амплитуда звукового давления изменяется в 50 раз. На низких и высоких частотах вследствие повышения наименьшего уровня диапазон суживается до 20 дБ. У флейты-пикколо по этой же причине диапазон на высоких частотах уменьшается до 15 дБ. Более широкий динамический диапазон, равный 35 дБ, характерен для органа.

Основные тоны звукоряда большой флейты лежат в пределах 286÷1200 Гц, а флейты-пикколо — в пределах 576÷2500 Гц. Огибающие спектров ряда основных звуков этих инструментов, приведенные на рис. 2.13, показывают малое содержание в них гармонических составляющих, вместе с которыми диапазоны расширяются соответственно до частот 9000 и 12 000 Гц. Низкочастотные трубы органа, имеющие по сравнению с флейтой бóльшую длину и мензуру (порядка 0,1), создают звучания очень низкой частоты, начиная с 16 Гц. Спектр их не очень богат, однако, управляя регистрами, его можно изменять. Верхняя граница диапазона — 16 000 Гц.

Процесс нарастания низко- и среднечастотных сигналов, создаваемых флейтой, занимает около 50 мс, и, так как запас воздуха в легких исполнителя мал, длительность нарастания сказывается на длительности следующего за ним стационарного сигнала. Большой запас воздуха, подаваемого к трубам органа, позволяет извлекать из

него звуки очень большой длительности. Это придает его звучанию исключительную певучесть. Так как трубы у органа много больше, чем у флейты, процесс нарастания сигнала в них протекает медленнее и занимает время до 300 мс, что видно из рис. 2.14, на котором показаны кривые нарастания сигнала основной частоты (131 Гц) и трех его гармоник (кривые *1, 2, 3* и *4*). Замедленный

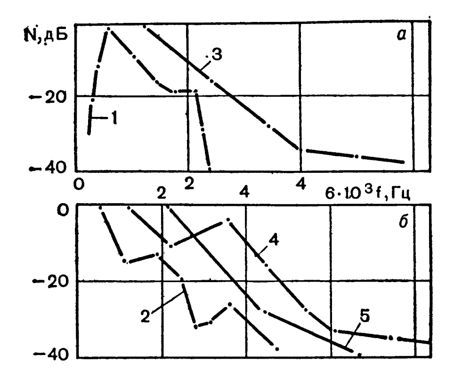


Рис. 2.13. Спектральные кривые флейты (*а*) и флейты-пикколо (*б*) для тонов 285 Гц (*1*), 576 Гц (*2*), 1150 Гц (*3, 4*), 2300 Гц (*5*)

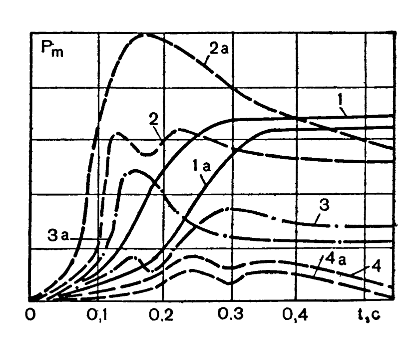


Рис. 2.14. Время установления основного тона и обертонов органа

темп нарастания сигнала украшает звучание органа, а подключение к трубам различных резонансных систем еще и разнообразит этот процесс как по амплитудам сигнала, так и по времени возникновения его частотных составляющих. В этом легко убедиться при сравнении групп кривых *1, 2, 3, 4* и *1а, 2а, 3а, 4а* (рис. 2.14), каждая из которых построена для случая использования одного из резонаторов (тонального или регистрового). Кроме того, переходные процессы органа, складываясь с реверберационным процессом зала, придают звучанию инструмента особую выразительность. Это объясняет, почему для хорошего звучания органа необходимо помещение со значительным временем реверберации.

Язычковые инструменты. К ним относятся одноязычковые (кларнет и саксофон) и двухъязычковые (гобой, фагот и некоторые другие).

Кларнет на средних частотах (500÷1000 Гц) способен создавать звуки, едва поднимающиеся над уровнем собственного шума зала. Самые же громкие его звуки превышают тихие на 48 дБ. Такой широкий динамический диапазон выделяет кларнет из всей группы, так как для саксофона он не более 38 дБ, а для гобоя и фагота равен только 30 дБ.

Из-за большой длины трубы кларнет на низких частотах ведет себя почти как закрытая труба. Это проявляется в подчеркнутости нечетных гармонических составляющих. Большое число голосовых отверстий (до 23) и возможность передувания позволяют возбудить на нем ряд тонов, которые вместе с гармоническими составляющими

лежат в широком диапазоне от 140 до 9000 Гц. Гобой и фагот обладают большим числом четных и нечетных составляющих, сосредоточенных в низкочастотной области. Как показывают кривые рис. 2.15, для первого из них характерны две форманты вблизи частот 1100 и 3200 Гц. Для второго сильные форманты располагаются у частот 500 и 1500 Гц. Полный частотный диапазон для гобоя укладывается в пределах 230÷÷8500 Гц, для фагота — в пределах 60÷2500 Гц.

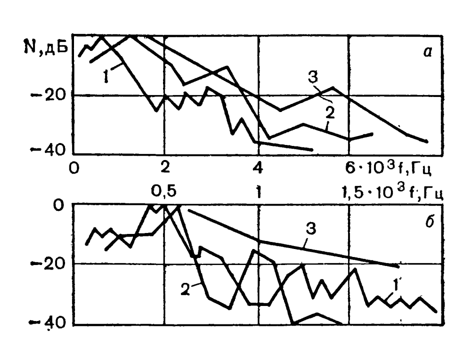


Рис. 2.15. Спектральные кривые звучаний гобоя (*а*) для основных тонов 240 (*1*), 435 (*2*), 1365 Гц (*3*) и фагота (*б*) для тонов 64 (*1*), 128 (*2*), 512 Гц (*3*)

Для кларнета — инструмента с малым объемом воздуха — время нарастания сигнала при острой атаке на всех частотах почти одинаково и равно 15÷÷20 мс, при мягкой атаке оно возрастает до 50 мс. Для гобоя и фагота, имеющих большие объемы, нарастание при острой и мягкой атаке на низких частотах длится соответственно 20 и 100 мс, на высоких же — в два раза меньше. Такая длительность переходных процессов не позволяет получать при игре быстрое и четкое чередования отдельных тонов.

Язычковые инструменты с амбушюром. Эта группа инструментов отличается от предыдущей большой массой и гибкостью «язычков», роль которых выполняют губы музыканта, малой мензурой и, главное, наличием небольшого резонатора. Таким резонатором является амбушюр (мундштук). Чашкообразный мундштук, применяемый при игре на трубе и тромбоне, подчеркивает высокочастотные составляющие, а воронкообразный, как у валторны, ослабляет их. Применение дополнительных резонаторов (сурдин) еще больше изменяет спектр, внося новые форманты.

Уровни интенсивности трубы на низких частотах изменяются от 53 дБ до 88 дБ. На высоких частотах изменения меньше, и динамический диапазон сокращается с 35 дБ до 15 дБ. У валторны динамический диапазон больше. Для низкочастотных сигналов он равен 40 дБ, а для высокочастотных — 20 дБ. Для тромбона возможно изменение амплитуды звукового давления в 60 раз, что отвечает динамическому диапазону в 36 дБ. Самый большой динамический диапазон, около 42 дБ, характерен для трубы, и, так как ее спектр заметно смещен в низкочастотную область, этот диапазон мало зависит от частоты.

У трубы, как и у любого другого открытого инструмента, изменение эффективной длины и скорости воздушного потока приводит к созданию ряда основных тонов. У обычной трубы эти сигналы лежат в границах 230÷1180 Гц. Наличие в ее спектре 25 гармонических составляющих расширяет частотный диапазон до 9000 Гц.

Валторна позволяет извлекать основные тоны, частоты которых лежат в пределах 55÷700 Гц (рис. 2.16, *а*). Около десяти ее обертонов располагаются вблизи частоты 800 Гц. Такая бедность высокочастотных составляющих связана с конусообразной формой мундштука. Правда, частотный спектр валторны сильно зависит от уров-

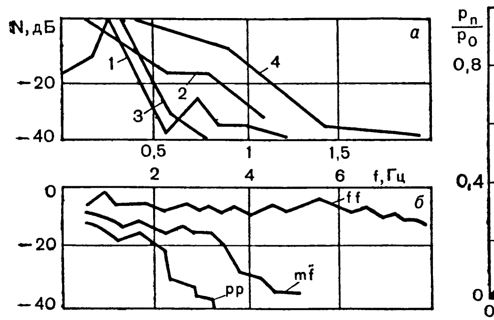


Рис. 2.16. Спектральные кривые звучаний валторны для тонов 80, 240, 288 и 426 Гц (*1, 2, 3, 4*) (*а*) и ее полный спектр (*б*) при различных уровнях (*pp*, *mf* и *ff*) сигнала

Рис. 2.17. Время установления основного тона (*1*) и обертонов (*2—5*) для трубы

ня сигнала (рис. 2.16, *б*). Когда уровень мал (*pp*), спектр получается редким и заканчивается у частоты 2000 Гц. При среднем уровне (*mf*) диапазон расширяется до 4000÷5000 Гц, а при наибольшем (*ff*) — до 7000 Гц.

Основные тоны тромбона лежат в пределах между частотами 50 и 580 Гц. Он имеет много обертонов (до 40), первые 20 из которых очень велики по амплитуде. Его частотный диапазон вместе с обертонами занимает область 50÷8000 Гц. Спектр трубы много беднее. Ряд ее основных тонов начинается частотой 33 Гц и кончается — 320 Гц, а 12÷15 обертонов размещаются в области до 4000 Гц, причем нечетные составляющие выражены более ярко, чем четные.

Время жесткой атаки для трубы (рис. 2.17) равно примерно 10÷20 мс. Как можно заметить, сравнивая кривые этого рисунка с кривыми рис. 2.8, полученными для скрипки, возникновение гармоник у трубы происходит не с опережением основного тона, а вслед за ним. Длительность процесса нарастания для всех гармоник одинакова, кроме третьей, для которой она в 2—3 раза больше. Для валторны процесс нарастания при мягкой атаке занимает 50 мс, что снижает ритмическую четкость звучания этого инструмента. Переходные процессы для тромбона и трубы очень похожи, но время нарастания сигнала у тромбона несколько больше и составляет 20 мс.

Голосовой аппарат человека в режиме пения во многом сходен с музыкальными духовыми инструментами. В нем подача воздуха осуществляется так же, как у органа, а способ возбуждения колебаний такой же, как у язычковых инструментов с амбушюром. Управ-

ление интенсивностью и частотой сигнала происходит также путем изменения ряда физических параметров, осуществляемого, правда, под психофизиологическим воздействием.

Частотный спектр голоса у рядового и опытного певца очень неодинаков. Если у первого из них спектральная кривая быстро спадает после частоты 2000÷3000 Гц, то у второго наличие сильных гармонических составляющих расширяет его до 5000 и даже 7000 Гц. В спектре ярко выделяется певческая форманта вблизи частоты 2000÷3000 Гц. Для голоса характерно также специфическое распределение гармонических составляющих в начальный период звучания. Как видно из рис. 2.18, одни из гармонических составляющих опережают основной тон, другие отстают от него, и время их нарастания изменяется от 10 до 150 мс. В широких пределах изменяются и амплитуды гармоник. Так, наиболее запаздывающая третья гармоника по амплитуде оказывается в 4÷5 раз больше основного тона.

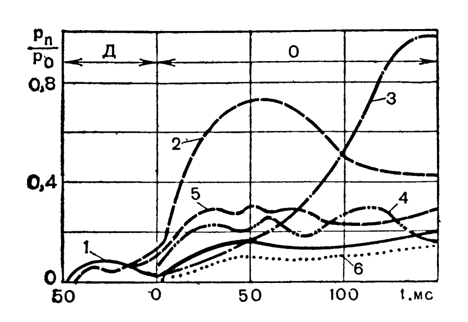


Рис. 2.18. Время установления основного тона *до* (*1*) и обертонов (*2, 3, 4, 5, 6*) для певческого голоса

2.5. Акустические характеристики ударных музыкальных инструментов и шумовых источников

В инструментах ударного типа в качестве звукообразующего элемента используются бруски, пластины или мембраны, а их возбуждение осуществляется ударом пластин друг о друга (тарелки) или ударом колотушки (ксилофон, челеста и др.). Очень тонкие, гибкие пластины (мембраны) натягиваются на жесткие каркасы (литавры, барабаны).

Инструменты пластинчатого типа. Ударные инструменты, в которых используются упругие бруски или пластины, делятся на инструменты с определенной частотой (ксилофон, челеста и др.) и с неопределенной частотой колебаний при большом содержании негармонических составляющих (тарелки, кастаньеты).

Динамический диапазон этих инструментов зависит от материала пластин (их упругости, внутреннего сопротивления), силы и характера удара. Для разных инструментов он неодинаков. Если для тарелок диапазон очень широк и достигает 62 дБ, для ксилофона и металлофона — 25÷30 дБ, то для челесты он равен только 20 дБ.

При ударе посредине пластины, расположенной на опорах, в ней возникают колебания, которые, считая толщину пластины малой, будут распространяться вдоль двух координатных осей x и y. Смещение каждой точки пластины, по подобию с (2.1) для линейной системы, будет характеризоваться выражением:

$$\xi = \sum_n \xi_n \sin \frac{n_x}{l} \pi x \sin \frac{n_y}{b} \pi y \sin (\omega_n t - \varphi_n), \qquad (2.6)$$

а частота колебаний определится равенством:

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{b}\right)^2}, \qquad (2.7)$$

где l и b — действующие длина и ширина пластины; n — любое число натурального ряда.

Из равенства (2.7) следует, что основная частота колебаний (при $n_x = 1$ и $n_y = 0$) находится, как $f_1 = \frac{c}{2l}$, и что кроме основной и кратных ей частот будут еще частоты, зависящие от l и b. Это делает частотные спектры звучания ксилофона и металлофона нерегулярными, что хорошо замечается на слух.

Основные звуки ксилофона, создаваемые набором все укорачивающихся пластин, укладываются в диапазоне частот 500÷4500 Гц, расширяясь из-за шумов и дополнительных тонов до 9000 Гц. Металлофон вместо деревянных имеет металлические пластины, а челеста — еще и резонаторы. Частотные диапазоны этих инструментов равны соответственно 1050÷4200 Гц, 260÷4200 Гц. Огибающие частотного спектра для тарелок и треугольника (рис. 2.19), являющихся инструментами с неопределенной частотой звучания, показывают, что каждый из них имеет много гармонических и негармонических составляющих, которые для тарелок укладываются в пределах 30÷16 000 Гц, а для треугольника — от 800 до 16 000 Гц.

Наименьшую длительность звучания имеют деревянные инструменты этой группы, наибольшую — металлические. Так, металлофон звучит после удара 3÷4 с и последними затухают колебания с частотами 500÷1000 Гц. Время послезвучания тарелок больше, и особенно долго не затухают составляющие, лежащие в области 1000÷4000 Гц.

Мембранные инструменты. Эта группа инструментов даже от ударных пластинчатых отличается своей большой мощностью и широким динамическим диапазоном.

Литавры — единственные инструменты этой группы, имеющие определенные частоты звучания. Это достигается использованием трех различных по диаметру мембран, натяжение которых может изменяться в процессе игры. Каждая из мембран имеет свой резонатор в виде металлического котла. Мощность инструмента достигает 20÷25 Вт, что в два раза превосходит мощность органа и в 50 раз — мощность фортепиано. Отношение между минимальной (*pp*) и максимальной (*fff*) амплитудами сигнала достигает 1:10 000, а динамический диапазон — 80 дБ. Динамические диапазоны большого и малого барабанов, сигналы которых не имеют определенной частоты, также велики и равны 72 и 70 дБ.

Возможность настройки литавр позволяет возбуждать колебания в диапазоне частот от 30 до 1500 Гц. Наличие же в них гармоничес-

ких и негармонических составляющих делают спектр частот крайне неравномерным, что можно заметить по кривой *1* рис. 2.20. Еще больше негармонических составляющих характерно для барабанов — большого и малого (кривые *2* и *3*). Их частотные диапазоны соответственно лежат в пределах 50—6000 Гц с наибольшей интенсив-

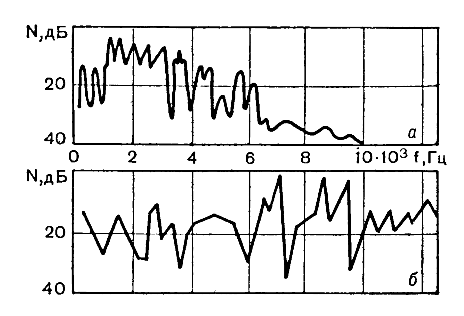


Рис. 2.19. Частотные спектры звучаний тарелок (*а*) и треугольника (*б*)

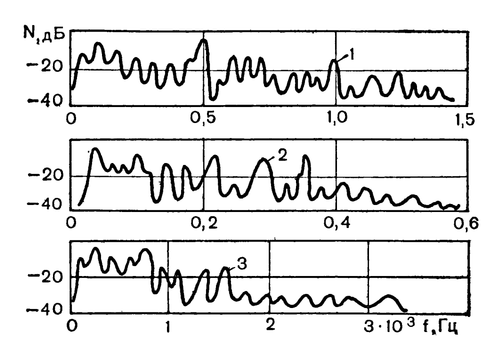


Рис. 2.20. Спектральные кривые литавр (*1*), большого (*2*) и малого (*3*) барабанов

ностью в области 350—400 Гц и 1000—4000 Гц с максимумом вблизи частот 500—1000 Гц.

Длительность послезвучания достигает нескольких секунд и зависит от массы и силы натяжения мембраны.

Шумовые источники, такие, как двигатели самолетов и автомашин, падающая вода, шелестящие листья, по своей природе более всего похожи на ударные музыкальные инструменты. Звукообразующие элементы у этих источников — твердые или жидкие тела, возбуждаемые ударом или трением. Они создают сигналы чаще всего негармонического типа. Уровни этих сигналов изменяются в широких пределах: от 110 дБ (мотор самолета, движущийся поезд) до 70÷60 дБ (легковой транспорт) и даже до 30÷25 дБ (шум дождя и листьев). Частотный спектр этих сигналов также крайне разнообразен. То он приближается к спектру «белого» шума с меняющейся плотностью по частоте, то занимает сравнительно узкую частотную полосу (гудки, сирены и др.).

2.6. Акустические характеристики оркестров и музыкальных ансамблей

Большое различие в мощностях отдельных музыкальных инструментов при их объединении в оркестр могло бы привести к маскировке звучания слабых инструментов наиболее сильными. Однако возможность маскировки исключается тем, что звучание слабых инструментов усиливается пропорциональным увеличением их числа. Таким образом, оркестр следует рассматривать как один большой пространственный источник звука с таким составом и численностью входящих в него групп инструментов, при которых существует определенное равновесие мощностей этих групп, или так называемый *музыкальный баланс*. Баланс симфонического оркестра, например, обеспечивается в том случае, когда группа струнных инструментов составляет около 70% всего количества (доля скрипок — 35%, альтов — 15%, виолончелей и контрабасов по 10%), группа деревянных духовых при равном числе инструментов — 12%, группа медных — 10% и ударных — 5%.

Если считать, что каждый из инструментов смычковой группы по мощности равен скрипке, то только эта группа симфонического оркестра численностью в 100 исполнителей будет обладать диапазоном 60 дБ. Некоторые авторы [3] считают, что динамический диапазон этого оркестра достигает 75 дБ, а для духового он составляет 70 дБ. Динамические диапазоны малого симфонического оркестра и оркестра легкой музыки несколько меньше и колеблются от 40 до 53 дБ. Для оркестра танцевальной музыки, где динамические оттенки меньше, и мужского хора диапазон около 40 дБ.

Частотный диапазон музыкальных ансамблей и оркестров занимает область от низшей частоты самого низкочастотного инструмента до высшей наиболее высокочастотного. Для симфонического оркестра инструментами, определяющими частотный диапазон, являются литавры и треугольник, отсюда диапазон его будет 30÷16 000 Гц. При игре оркестра с органом диапазон расширяется в сторону низких частот до 16 Гц. Для духового и эстрадного оркестров определяющими парами инструментов будут труба-бас и флейта, контрфагот и тарелки, а частотные диапазоны — соответственно от 50 до 10 000 Гц и от 25 до 16 000 Гц.

О временно́м распределении сигналов разной интенсивности для симфонического и эстрадного оркестров можно судить по кривым рис. 2.21. Из него следует, что для эстрадного оркестра более характерно исполнение на повышенном уровне. Для него время, когда звуковое давление не менее чем 0,4÷0,6 от максимального, составляет 50÷30% общего времени, тогда как для симфонического оркестра такое же время занимает исполнение при более низких (0,05÷0,1) относительных значениях звукового давления. Для сравнения на рис. 2.21 приведена кривая временно́го распределения сигналов при исполнении на фортепиано.

Схема рис. 2.22 помогает обобщить результаты анализа акустических характеристик ряда источников звука.

1. Человеческий голос в режиме речи и пения отличается по мощности и динамическому диапазону (на 30÷45 дБ). Частотный его диапазон укладывается в пределах 80÷10 000 Гц.

2. Струнные инструменты имеют среднюю мощность около 600 мкВт и неширокий динамический диапазон (30÷35 дБ). Их частотный диапазон неодинаков. Для скрипки он ограничен частотами 192÷10 000 Гц, а для контрабаса — частотами 40 и 5000 Гц.

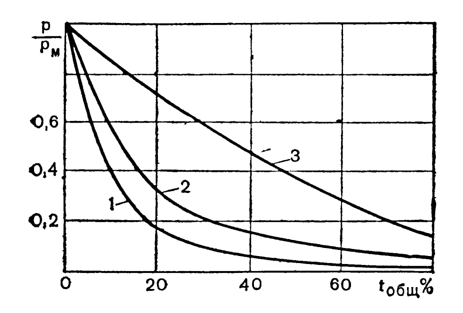


Рис. 2.21. Временнóе распределение звукового давления для симфонического (*1*), эстрадного (*2*) оркестров и фортепиано (*3*)

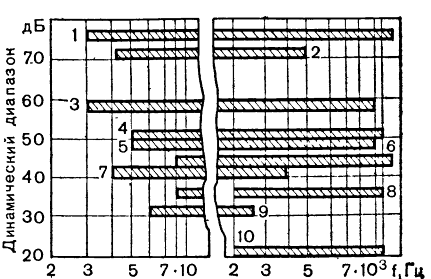


Рис. 2.22. Динамический и частотный диапазоны симфонического и духового оркестров (*1*, *4*), барабана (*2*), тарелок (*3*), голоса — пение и речь (*5*, *6*), трубы (*7*), виолончели (*8*), фагота (*9*) и треугольника (*10*)

3. Деревянные духовые инструменты имеют среднюю мощность порядка 410÷700 мкВт, и динамический диапазон такой же, как у струнных. Частотный диапазон их ограничен снизу частотой 60 Гц (фагот), а сверху — частотой 9000 Гц (флейта).

4. У медных инструментов выше средняя мощность (около 0,3 Вт), более широкий динамический диапазон (35—42 дБ) и примерно такой же, как у деревянных, частотный диапазон.

5. Наибольшее различие в акустических параметрах наблюдается у ударных инструментов. Так, их мощности и динамические диапазоны очень изменяются от малых значений — 12 мкВт и 25 дБ (ксилофон) до больших — 20 Вт и 80 дБ (литавры). Частотные диапазоны или узки, как у литавр, или широки, как у треугольника.

6. Оркестры и музыкальные ансамбли по акустическим параметрам также заметно отличаются друг от друга. Мощность их изменяется от десятых долей до нескольких ватт. Динамический диапазон от 50 до 75 дБ, а частотный диапазон — самый широкий.

7. Источники натуральных шумов еще больше, чем ударные инструменты, различаются по своей мощности (от 0,1 мкВт до 10 Вт), динамическому диапазону (20÷80 дБ) и частотному спектру.

8. Время нарастания музыкальных сигналов изменяется в пределах от 10÷20 мс (труба, флейта и др.) до 300 мс (орган).

9. Характеристики направленности медных духовых обострены больше, чем струнных инструментов. У ударных инструментов они близки к шаровым. Неравномерные характеристики имеют инструменты большой протяженности.

Глава 3.

ОСОБЕННОСТИ ХУДОЖЕСТВЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ЗВУЧАНИЙ

3.1. Роль звукорежиссера в создании художественной передачи

Основой художественной передачи являются литературные, драматические или музыкальные произведения, отображенные в мастерстве исполнителей. Источники же звука служат средствами передачи, технические возможности проведения которой определяются их акустическими характеристиками. Знание этих характеристик позволяет звукорежиссеру ставить и решать вопросы, относящиеся к выбору звукопередающей аппаратуры и способов управления такими параметрами сигналов, как их уровень, динамический и частотный диапазоны, временные характеристики звучания. Однако этого недостаточно для управления тончайшими оттенками звучания, которые и определяют его художественную ценность.

Управление сигналами необходимо не только для исправления возможных недостатков звукопередающей системы, но и для устранения неблагоприятного влияния условий проведения передачи, которые заметно отличаются от условий непосредственного прослушивания. Внимание к ним позволяет звукорежиссеру с большей полнотой и яркостью донести до слушателя своеобразие каждой художественной программы. Более того, пользуясь средствами управления, он может разумно расширить возможности естественных источников звука, подчеркнуть звучание, привнести в него такие элементы, которые сделают его более ярким и высокохудожественным. Звукорежиссер выступает участником творческого процесса и вместе с режиссером вносит свой вклад в создание и совершенствование задуманного автором художественного образа. Будучи первым квалифицированным слушателем, он постоянно оказывает помощь драматическому актеру, певцу, музыканту в поиске более точного звукового решения каждой роли. Его собственное вйдение образного строя всего произведения, каждой его сцены делает его сопричастным к созданию кинематографического или радио-телевизионного произведения.

В условиях кинематографа звукорежиссер добивается сохранения единства стиля речевых передач на протяжении всего фильма, отдельные сцены которого снимаются с большими временными перерывами. Он следит за тем, чтобы из речи исполнителей была исключена характерная для театра манера ее подачи. Работая на радио, он по возможности восполняет отсутствие зрительного восприятия обстановки драматических передач соответствующими представлениями, создаваемыми звуковыми средствами.

Звукорежиссер должен учитывать жанровое разнообразие кино- и телевизионных передач, так как требования к содержанию и характеру речевого и музыкального сопровождения при смене жанра резко меняются. В частности, очевидно, что речь киноактера, драматического артиста или диктора должна соответствовать зрительной информации, отражать ее особенности и характер исполняемой роли. Чтобы выявить эти особенности для каждого из видов передач, необходимо изучить характерные черты отвечающих им звучаний.

3.2. Акустические характеристики художественной речи

Разговорная речь представляется в виде ряда различных звуковых импульсов, разделенных паузами неодинаковой длительности. При ее помощи осуществляется общение между людьми, передаются мысли, чувства, настроение и воля говорящего. Чтобы передать ту или иную мысль, необходимо произнести определенную последовательность слов, составляющих одну или несколько целых фраз. Следовательно, мысль представляется в виде грамматически организованных фраз и слов. Фразы и слова определяются их фонематическим составом.

Смысл одного и того же грамматического предложения зависит от интонации, под которой понимают прежде всего *мелодику* слова или фразы, позволяющую точнее передать мысль говорящего. Более глубокий и точный смысл, вкладываемый в слова речи, К. С. Станиславским был назван *подтекстом* [31].

Мелодика слова связана с изменением высоты звучания речи, которое воспринимается суммарно без выделения основного тона. Звуки речи характеризуются общевысотными признаками, т. е. изменением тембральной высоты. Изменение этой высоты при произношении слов и фраз позволяет по-разному воспринимать смысл текста, изменять характер подтекста. Часто подтекст заложен автором в самом произведении, и его можно почувствовать и уловить при чтении. Вместе с тем исполнитель и режиссер могут внести свой подтекст, который определяется глубиной ви́дения ими данной сцены, их представлением о характерах действующих лиц. Следует вспомнить, например, как изменяется подтекст в стихотворении Беранже «Старый капрал», переложенном на музыку А. С. Даргомыжским. Таким образом, на смысловое значение слова, фразы можно повлиять изменением одной из акустических характеристик голоса — его высоты.

Раскрытие мысли, выделение подтекста связано с особой подчеркнутостью звучания отдельных слов и частей фразы, которая достигается увеличением силы звука. Уровень громкости речи все время меняется в зависимости от смысла и чувств, определяемых целевой направленностью данного отрывка или всего произведения. Эта направленность, создаваемая произношением, волевым воздействием исполнителя на мысли и волю слушателей, которое К. С. Станиславский называл *словесным действием*, определяет целостность под-

текста и художественное достоинство всей передачи. Следовательно, и здесь в качестве средства повышения художественной ценности речи выступает физический параметр голоса — его сила или громкость.

Четкость мысли, убедительность подтекста, действенность слова связаны с естественностью и внутренней обоснованностью пауз, оттеняющих отдельные слова или части фраз. Эти оттенки требуют изменения длительности пауз и самих слов, темпа всей речи. Такие временны́е изменения звукового потока, характерные для речи, определяются также физическими параметрами голосового аппарата.

Таким образом, звуки речи в процессе творческого создания звукового образа претерпевают изменения по высоте, интенсивности и по длительности звучания и пауз. Яркость же создаваемого образа зависит от богатства высотных, громкостных и временны́х оттенков звучания речи, которые субъективно воспринимаются как звучность, мелодичность, легкость, красочность, «полетность» звука. Объективные физические параметры голоса, будучи творчески использованы в процессе формирования звукового образа, словесного действия, оказываются подчиненными общей задаче создания художественной речевой передачи.

3.3. Внутренняя и внешняя речевая техника

Искусство владения художественным словом связано с установлением обратной связи со слушателями, с устремленностью исполнителя своим словесным действием побудить их к соучастию в этом действии. Достижение этой цели обусловливается единством двух сторон художественной речи — внутренней и внешней исполнительской техники.

Внутренняя техника — основа для создания внутреннего творческого самочувствия исполнителя, необходимого для естественного словесного действия. Идейное раскрытие текста создает у исполнителя ви́дение событий и настроений людей, участвующих в них. Конкретность, образность, многообразие этих ви́дений, возникающих на основе его жизненного опыта, превращает передачу авторского текста в рассказ о лично пережитом, наполняет его речь яркими человеческими эмоциями. Логика мысли, глубина чувства, выражаемые многообразием оттенков голоса, делают речь яркой, убедительной и мелодичной, способной взволновать слушателя, пробудить его воображение.

Внешняя техника предполагает наличие у исполнителя необходимых навыков и умений во владении голосом, дыханием, дикцией, произносительными (фонетическими) нормами, темпом и ритмом устной речи. Внешняя техника позволяет слушателю сосредоточить внимание на содержании художественного произведения. Она повышает выразительность речи, помогает полнее раскрыть внутренний мир героя и, следовательно, увеличивает эстетическую ценность речевых передач.

Голос (его *диапазон, сила, высота, тембр, гибкость,* наличие оттенков, которые субъективно воспринимаются как звонкость, сочность, мягкость, легкость) — один из элементов внешней техники. Его внешние данные позволяют правильно передать смысл произведения, способствуют созданию образа. Сила голоса должна отвечать силе чувств героя. Она должна достигаться без перенапряжения речевого аппарата, быть такой, чтобы повышенная по громкости речь актера со сцены воспринималась бы удаленными слушателями четко и со всеми тончайшими динамическими оттенками, характерными для разговора на близком расстоянии. Гибкость голоса, владение его высотным регистром, богатством тембральных оттенков — важнейшие особенности исполнителя.

Вторым элементом внешней техники выступает *фоноционное дыхание.* Оно должно быть полным, неслышным и произвольно регулируемым, с коротким вдохом и медленным выдохом, легко приспосабливаемым к изменению характера речи. Звуки речи и дыхание взаимосвязаны.

Хорошая *дикция* тоже элемент внешней техники. Она определяет четкость и ясность произношения каждого звука, слова и фразы.

Владение *фонетическими нормами* литературной речи представляется как одна из частей внешней техники исполнителя. Эти нормы существуют для гласных и согласных звуков. Например, гласные ударные звучат яснее и дольше, чем безударные. Чем дальше от ударных стоят безударные звуки, тем менее полно и более коротко они произносятся. Для каждой из групп гласных и согласных звуков сейчас различают до сорока и больше фонематических оттенков.

К элементам внешней техники относят и *темпо-ритм речи.* Владение темпом речи связано с умением быстро и ярко передать сменяющие друг друга образы, чувства, настроения. Внешняя техника всюду предстает в строгом органическом единстве с внутренней. Как без владения голосом нельзя достигнуть нужной выразительности речи, так и внешние его данные не могут проявиться без эмоциональной настроенности исполнителя, вне связи с создаваемым им звуковым образом.

В заключение следует сформулировать некоторые выводы.

1. Внутренняя и внешняя техника связана с мастерством владения акустическими и фонематическими параметрами голоса.

2. Эта техника опирается на законы творчества, которые выражают прежде всего качественные соотношения. Количественные соотношения подчинены творчеству и зависят от своеобразия трактовки художественного произведения, от словесного действия исполнителя.

3. На передачу элементов внешней и внутренней техники могут влиять акустические параметры звукопередающих систем и условия, в которых осуществляется передача (размеры и акустика помещения, размещение исполнителя относительно микрофона, отсутствие слушателей и т. д.).

3.4. Основные элементы речевой выразительности

Мысли, подтексты и ви́дения, заложенные в авторском тексте, раскрываются исполнителем при умелом использовании выразительных средств живой устной речи. Такими средствами, или элементами речевой интонации, являются *ударения, паузы, мелодика речи,* ее *ритм* и *темп.* Несмотря на малочисленность этих элементов, их внутреннее разнообразие и возможности совместного варьирования так велики, что позволяют исполнителю передать все мельчайшие оттенки человеческих мыслей и чувств. Интонационная выразительность речи вскрывает мысль автора, определяет подтекст, вызывает чувства, настроение, желания и действия. В соответствии с этим можно установить несколько функций интонации.

Логическая (семантическая) функция направлена на выявление смысла высказывания, точную и убедительную передачу мысли. Это проявляется в формировании понятий, во взаимной их увязке, в нахождении формы изложения мысли. Она требует выделения основных речевых звеньев в их логической взаимосвязи, что выражается в силе и правильности фразовых ударений, зависящих от соподчиненности фраз и их роли в передаче мысли. Логическая функция является основной и относится к любому виду речи.

Эмоциональная функция связана с логической и отражает внутреннюю жизнь и чувства говорящего. Способы выражения этой функции, как и самих чувств, очень многообразны, они проявляются в интонационном богатстве речи, в ее яркой выразительности.

Волевая функция заключается в том, что каждое речевое высказывание должно вызывать у слушателя стремление к определенному действию. Она проявляется как результат словесного действия исполнителя и направлена на то, чтобы возбудить у слушателя волевые процессы, повлиять на его взгляды, поступки.

Все три функции в речевом акте выступают в единстве и полном взаимодействии. Логическая функция, открывая помыслы автора, служит также основой для проявления чувства и речевого действия.

Интонация исходит из творческого освоения художественного произведения и сообразуется с такими общими закономерностями литературного языка, как *ударение, пауза, фразовая мелодика, ритм.*

Ударения, подчеркивающие в речевом потоке главные слова, называются *фразовыми.* Они важнейшие среди других ударений. Ударные слова произносятся с некоторым усилением голоса. Выбор главного слова и сила ударения зависят от важности мысли и заложенных в нее понятий, от психологической насыщенности и грамматического построения фразы или ее звеньев. Такое разнообразие причин приводит к дополнительному делению фразовых ударений на *логические, психологические, ритмические* и *грамматические.*

Повествовательная фраза и ее логические звенья требуют ударения на последнем значимом слове. Логическое ударение необходимо для выделения нового или важного понятия. Если таких поня-

тий несколько, ударения принимают соответствующие им слова («не оди́н, так друго́й»). Изменение ударения в одной фразе меняет ее смысловое значение. Например, в зависимости от характера вопроса: «кто? или что?» — ответ может звучать так: «*Я́* сделаю это» или «Я сделаю *э́то*». Сила ударения увеличивается для сохранения общности слов в длинной фразе или для усиления психологического воздействия на слушателя. Она меняется в зависимости от перспективного развития повествования.

Паузы в фразе несут большую смысловую и выразительную нагрузку. Классическим примером является фраза из исторического анекдота: «Казнить нельзя помиловать». Пауза до или после слова «нельзя» меняет ее смысл на обратный.

Длительность паузы определяется характером текста. Она увеличивается при ускорении темпа речи, при большой разобщенности частей фразы, при передаче душевных переживаний. Кроме временно́й темпориальной паузы различают еще нетемпориальные, когда ощущение паузы создается без перерыва в звучании. Паузы, как и ударения, могут быть грамматическими, логическими, психологическими и физиологическими. Пауза вместо пропущенного слова («кругом — вода»), до и после вводного предложения относится к первой группе. Среди психологических выделяют паузы припоминания: «А этот — |как его| он турок или грек». (*А. Грибоедов*), паузы умалчивания и напряжения: «Найду ли краски и слова, пред ним ||| живая голова» (*А. Пушкин*). Физиологические паузы используются для передачи физического состояния героя.

Фразовая мелодика, под которой понимают изменение основного тона речи, связана с ее смысловой и эмоциональной сторонами. В различном слоговом выражении высота тона гласных звуков несколько варьируется. Мелодика слова и мелодический рисунок всей фразы подвергаются еще большему изменению. Семантическая и эстетическая функции речи находят свое выражение в многочисленных тональных оттенках ее звучания.

Есть много интонационных мелодик, которые легко понимаются. Среди них наиболее яркими являются повествовательные, вопросительные и восклицательные. Особенность *повествовательной мелодики* заключается в том, что ударные слоги первой части фразы произносятся с повышением тона, тогда как во второй части они понижаются, создавая впечатление ее законченности. *Вопросительная* мелодика требует повышения голоса на слове, являющемся смысловым центром вопроса («Вы идете домо́й?»), или на вопросительном слове («Кто́ идет домой?»). *Восклицательная мелодика* связана с выражением очень различающихся эмоций и имеет неодинаковый характер.

Ритм — это многократная повторяемость звучаний. Она может быть смысловой и звуковой. В повторяемости одной и той же или близкой мысли легко улавливается *смысловой ритм;* в повторности высоты, тембра, темпа обнаруживается *звуковой ритм.* В речевой передаче стихов ритмичность создают ударения, в прозаической речи — ударения и паузы.

К временны́м характеристикам речи кроме ритма следует отнести и *темп* речи, который зависит от степени важности сообщения или от взволнованности и напряженности событий, о которых ведется рассказ.

Таким образом, все выразительные средства речи, будучи подчиненными передаче ее смысла, чувства и воли автора и исполнителя, связаны прежде всего с умелым творческим использованием физических характеристик звуков — их силы, динамики, высоты и временны́х данных.

3.5. Стилевые особенности речи

Общее назначение, функции и выразительные средства устного слова едины. Они существуют вне зависимости от того, где применяется это слово. Однако чтобы слово звучало убедительно, было бы подлинно художественным, нужно все выразительные средства подчинить общему стилю произведения, исполнительскому ви́дению эпохи, условий действия и характера героя, которые воссоздаются в нем. Стиль речи — это не только «различные формы речи, приспособленные к разным социальным условиям» (*Л. Щерба*), но и способ осознания и выражения в художественной передаче окружающей действительности.

Для драматического и эстрадного артиста, киноактера, диктора на радио и в телевидении пути творческого освоения текста, характер словесного действия и приобщение к творческому самочувствию одинаковы. Однако соотносительность выразительных средств, используемых ими, должна быть разной. Изменение исполнительской задачи или исходного литературного материала приводит к изменению относительной значимости семантической и эстетической функций речи и требует изменения стиля, творческой манеры подачи речевого звучания.

Основная задача драматического актера — создание на сцене театра образа человека, действующего в определенных условиях. Выполнение этой задачи, театральные условности, удаленность зрителей от места действия исполнителей требуют особой подчеркнутости в гриме, жесте и в звучании слова. Сценическая речь определяется не только характерами звуковых образов и событий, но и жанрово-стилевыми особенностями спектакля, не только «жизненной и социальной... но и *театральной* правдой» *(В. И. Немирович-Данченко)* [31].

Кинематографическая иллюзия реальности связана со стремлением исключить любые условности театра. Возможность вынести действие за пределы сценического пространства, показать на экране любую жизненную ситуацию и обстановку делает достоверным зрительное восприятие изображения, а это требует от киноактера большой *жизненной* правды слова. Реальности увиденного должна отвечать безыскусственность услышанного слова. «Актер кино, играя на натуре... не должен чувствовать себя чуждым и отличным от окружающей реальности» (*В. Пудовкин*) [6]. Зрительные кадры должны

быть так подобраны, чтобы мысли, чувства и настроения героев фильма, их физические и словесные действия проявлялись в единстве наиболее правдиво и ярко.

Театральная подчеркнутость жеста и речи в кинематографе оказалась ненужной. Возможность любого «приближения» действующих лиц путем съемки изображения крупным планом и управление акустическими параметрами речи позволяют показывать все детали игры актера, наблюдать «тончайшие движения его тела и подслушивать интонации его голоса» (*В. Пудовкин*) [6]. В этом проявляется сильная сторона кинематографа, этим подчеркивается важность умения полно использовать широчайшие возможности кинотехники.

Как бы точно ни выражало изображение авторскую мысль, оно одно не в состоянии передать эту мысль в полном объеме. Только в союзе со словом, музыкой, в единстве с ними, при полном соответствии стиля словесного действия правдивости зрительного образа, кинофильм становится подлинным произведением искусства. В кинематографе роль «театральной правды» в «трех правдах» Немировича-Данченко сведена до минимума в пользу правдам «жизненной и социальной».

Слово расширяет и углубляет информативное содержание фильма, несет колоссальную эмоциональную нагрузку, создает образное обобщение, выражая идею произведения. Какой поток чувств возбуждает короткий разговор с мальчиком-рабочим — случайным виновником поломки самолетов в фильме «Особо важное задание» (режиссер *Е. Матвеев*). Ему невдомек чрезвычайность совещания, на которое его вызывали. Когда спросили, что ему сказали на совещании, он ответил: «Сказали, чтобы свой орден носил». Или вот в фильме «Иваново детство» другой мальчик вспоминает тягостные дни войны. Звучат пьяные голоса, грубые окрики на немецком языке, сменяемые спокойной, ласковой речью матери. Короткий эпизод, а в нем большая глубина пережитого, широкая картина фашистской оккупации.

В фильмах, как и в спектаклях, есть свои условности, своя «кинематографическая правда». Это наплывы, наезды, смена планов при съемке изображения, и внутренний монолог героя, и речь на фоне пейзажа или в сопровождении музыки, но все это близко к правде человеческих видений и дум. Они ведь и вправду идут вперемежку, связываясь с изменяющимися образными представлениями.

Речевой стиль чтеца-рассказчика отличается от стиля артиста театра или кино. В основе этого отличия лежит то, что мысль, заложенную в литературном произведении, чтец должен донести до слушателя в виде ряда художественных образов, да еще воссоздать словами ту обстановку, которая в условиях театра и кино возникает благодаря зрительному восприятию. Особый речевой стиль чтеца обусловлен и тем, что он действует в настоящем, рассказывает о прошлом и будущем и от себя и от автора. Как писал преподаватель чтения Э. Легуве, «актер — солист, играющий в оркестре; чтец — составляет весь оркестр».

Своеобразие речевого стиля артиста-диктора обусловлено как характером литературного материала, так и условиями его передачи. Информативность материала, недостаток в нем художественных элементов требуют от исполнителя образного ви́дения тех событий и фактов, о которых он говорит. Только при этих условиях артист в состоянии обогатить текст собственными представлениями, оттенить подтекст, ярче выделить элементы эмоционального характера. Отсутствие обратной связи с невидимой аудиторией подчеркивает важность установления контактов с нею путем образной передачи мысли, глубоко прочувствованной самим исполнителем. Все это требует от него большой непринужденности, естественности, искренности и простоты.

В кинематографе и на телевидении дикторский текст связывается обычно с показом научно-популярных или хроникальных фильмов. Здесь важно использовать слово не только для описания событий, явлений и картин природы, происходящих на экране, но и для усиления чувств, возникающих при этом у зрителей.

В условиях радиовещания и телевидения важной особенностью является большая оперативность подачи информационных материалов. Это требует от исполнителей быстрой ориентации в них, остроты мышления и мастерства, позволяющих умело сочетать логическую и эстетическую стороны передачи, тонко и ненавязчиво использовать в них выразительные средства речи.

Итак, при общности подхода к решению задачи, общности выразительных средств речи характер самих передач, условия их решения требуют от исполнителей определения меры в использовании этих средств, правильного выбора соотношения семантической и эстетической функций речи.

3.6. Выразительные средства одноголосной музыки

Музыка — это мир звуков, физические параметры которых, такие, как *сила, высота, длительность,* организованы определенным образом. Звуки возбуждаются в одиночку или группами, одновременно или последовательно в сложных сочетаниях и при постоянном изменении их физических параметров. Как и в случае речи, изменения каждого из параметров музыкальных звуков создают впечатления, связанные с жизненным опытом, а потому и понятные для человека.

Увеличение *громкости* звука воспринимается как признак угрозы, повышенной возбужденности; ослабление — как признак успокоенности и доверия. Изменение *высоты* звука тоже воспринимается по-разному. Так, высокие звуки создают впечатление быстрого движения (свист ветра) или малых размеров источника звука (писк комара): *низкие* звуки характеризуют грандиозность и силу явления, опасность (гром, разрыв снаряда). Такой физический параметр, как *темп,* связан с представлениями о скорости движения,

о быстроте развертывающихся событий, увеличении внутренней напряженности.

Таким образом, определенная организованность различных звуков, изменение их физических характеристик могут вызвать у человека не только определенные мысли, но и разнообразные чувства. Отсюда следует, что музыка, как и речь, черпает свои выразительные средства прежде всего из привычных жизненных представлений, из веками приобретенного опыта. Однако музыка располагает и новыми выразительными средствами, найденными людьми и постепенно ими освоенными. Они проявились в виде особой организованности музыкальных звуков и их сочетаний по таким признакам, как высота и ритм звука.

Мелодический интервал лежит в основе такой организованности звуков, которая открывается при их сопоставлении по высоте. Дело в том, что слух воспринимает высотные интервалы между следующими друг за другом звуками как одинаковые при определенном отношении их частот. Это позволило поделить звуки на большие группы — *октавы*. Высокая различающая способность слуха привела к необходимости поделить каждую из этих групп на более мелкие интервалы. Интервалы, определяющие высотное «расстояние» между двумя последовательно взятыми звуками, могут отличаться на одну, две (*интервал-секунда*), три (*терция*), четыре (*кварта*) и больше ступеней. Их выразительность разнообразна. Энергичное начало «Интернационала», «Марсельезы», песни «Священная война» определяется интервалом кварта; грустный оттенок слов песни «Не о том скорблю, подруженьки...» связан с интервалом *малая секунда;* певучесть мелодии песни *В. Соловьева-Седова* «Соловьи» опирается на интервал *секста*.

Лад (согласие) — система слаженного звучания, обусловленная взаимным тяготением звуков. В ней проявляется новое качество звука — его устойчивость или неустойчивость. К устойчивому звуку, называемому *тоникой,* тяготеют другие звуки. Тоника снимает неустойчивость предыдущих или следующих за ней звуков. Это, например, слышно в песенке Роберта из фильма «Дети капитана Гранта»: «...кто ищет, тот всегда най-*дет*». Лад выделяет отдельные интервалы, увеличивая выразительность звучания. Особенно это относится к главным ладам — *мажору* и *минору,* которые стали выразителями разных чувств: первый — бодрости и радости, второй — суровости, подавленности.

Тональность всего музыкального произведения как раз и зависит от того, какая из тоник при их смене является главной. Господствующая роль одной тоники объединяет все звучания, делает музыкальную мысль полной и законченной. Появление новых временных тоник, подчиненных главной, их движение вокруг этой главной придает динамический характер развитию музыки.

Тембр не принадлежит к чисто музыкальным выразительным средствам — он присущ любым натуральным звучаниям и тесно связан с высотными призвуками (обертонами), которые возникают одновременно с основным тоном. Каждый человеческий голос, музы-

кальный инструмент имеют свой тембр, который может изменяться в зависимости от способа звукоизвлечения. Разнообразие тембров, способных придать основным тонам оттенок нежности, теплоты, угрозы или страха, заметно сказывается на создании выразительных музыкальных образов.

Важным выразительным средством музыки является определенная соотносительность звуков по времени, по силе подчеркнутости, определяемой ритмом. *Ритм* — это временная организованность, выражающая соотношение длительностей отдельных музыкальных звуков, периодичность, отмечаемая их усилением. Периодичность сильных звуков, идущих рядом со слабыми, определяет музыкальный размер звучания. *Размеро-ритм* — важнейший элемент музыкальной выразительности. Ритмический рисунок музыкального произведения то определяет характер танца, ритм труда («Песня косаря» *П. И. Чайковского*), то выражает состояние беспокойства (барабанный бой перед казнью) или высокой торжественности (колокольный перезвон в сцене венчания царя Бориса в опере *М. П. Мусоргского* «Борис Годунов»). Используя ритм и динамику при игре на ударных инструментах, можно выразить высшую степень возбужденности. Чаще используются размеро-ритмы двух- и трехдольные. В маршевом такте, например, две доли — ударная и безударная, в такте вальса — их три.

Важным элементом выразительности является *темп*, или скорость исполнения. Веселые, энергичные музыкальные произведения требуют быстрого, тогда как торжественные и печальные — медленного темпа. Темп исполнения может быть постоянным или меняющимся, переходя через ряд ступеней.

Сила звука, его *динамика*, характеризующая изменяемость силы, сильнейшим образом влияет на выразительность всего мелодического построения. Это, как отмечалось, широко используется в речи. И все-таки наиболее тонкую нюансировку этот звуковой параметр находит в мелодии. Различные ступени — forte и piano, усиление (crescendo) и ослабление (diminuendo) громкости звука связываются с большим диапазоном человеческих чувств от ласковости до гнева, от успокоенности до страха.

Большое число выразительных средств, их изменяемость, богатейшие возможности их сочетания при последовательном и параллельном использовании позволяют музыке запечатлеть все многообразие человеческих чувств, все их тончайшие оттенки.

3.7. Мелодия, гармония и полифония

В речи из звуков складываются слова, фразы, предложения, выражающие собой определенные понятия, мысли и чувства. Логически связанные фразы соединяются в тематические части, создающие художественное произведение. Также и в музыке. Отдельные, отличающиеся по высоте звуки складываются в короткие, имеющие определенную смысловую самостоятельность музыкальные элементы — *мотивы*. Они соединяются в *музыкальные фразы*, из которых

вырастает *мелодия,* являющаяся одноголосной носительницей музыкальной мысли. Законченные мысли — мелодии — рисуют некие картины, создают образ, определяют содержание и характер всего музыкального произведения (например, характерная ария Фигаро в опере *Дж. Россини* «Севильский цирюльник»). Как в основе литературного произведения лежит некая фабула, так и в музыкальном произведении объединяющим центром является мелодия.

Мелодия впитала в себя все выразительные средства музыки, она соткана из элементов выразительности и не может существовать без высотной, ладовой организации звуков, без мелодического движения, метра, ритма, темпа, динамики, как и сама музыка немыслима без мелодии. «Мелодия в музыке то же, что образ и чувство в поэзии» (*О. Бальзак*). Мелодия выступает в единстве всех выразительных средств музыки, обогащенная каждым из них многообразием тончайших оттенков, передаваемых ими чувств. Недаром ее называют душой музыки. Несмотря на внутреннее единство, она может быть расчленена как по признакам музыкальной выразительности, так и по взаимоподчиненности отдельных ее частей. По последнему признаку она делится на фразы, обладающие определенной самостоятельностью. В мелодии как бы обозначаются знаки препинания, и чем выразительнее это обнаруживается, тем ярче вскрывается заложенная в ней мысль. Место рассечения (цезуры) мелодии на фразы выражается короткими паузами, во время которых исполнители обычно меняют дыхание. В песне музыкальные фразы чаще всего совпадают со стихотворными строками.

Фраза может состоять из ряда более мелких частиц — *мотивов.* Они создают определенную характерность мелодии. Если мотивы оказываются яркими и запоминающимися, то их называют *лейтмотивами.* Так, например, в словах «Песни о Родине» *И. Дунаевского:* «Широка | страна | моя | родная || много в ней | лесов | полей и рек» || — заключены семь мотивов и две музыкальные фразы (разделены одной и двумя чертами).

Восходящие и нисходящие движения мелодии создают определенный мелодический рисунок. Равное чередование движений делает этот рисунок волнообразным, а увеличение интервалов придает ему бо́льшую определенность и яркость. Нисходящие движения вызывают чувство неуверенности, уныния; восходящие — чувство душевного подъема, быстрого движения. Смена подъемов и спадов, больших и малых интервалов создает определенный характер мелодии. Восходящее движение вместе с нарастающей динамикой усиливает напряженность звучания, приводит его к высшему пределу, к кульминации.

Таким образом, мелодия не только выражает музыкальную мысль — она рассказывает о явлениях природы, сражениях, праздниках, создает яркие образы людей, возбуждает всю гамму человеческих чувств.

В музыке, как и в речи, объединяются семантическая и эстетическая функции. Однако главенствующим в ней является эмоциональное начало. Для нее характерно мышление обобщенного типа,

зато она сильнее речи в передаче широкого диапазона чувств и величайшей их глубины. Вот почему говорят, что там, где кончаются выразительные возможности речи, вступает в свои права музыка.

Когда одноголосная мелодия сопровождается рядом определенным образом составленных созвучий (аккордов), выразительность ее возрастает. Изменение последовательности этих созвучий может резко изменить характер выразительности всей мелодии. Следовательно, такие созвучия, как более ярко раскрывающие эмоциональное содержание мелодии, могут быть отнесены к новым средствам музыкальной выразительности. Аккордовое сопровождение, не имеющее собственного мелодического значения, но являющееся основой для развития мелодии, принято называть *гармонией*.

В гармонии проявляются новые сочетания красок, новые их тона. Она как бы высвечивает самые мелкие детали выразительных черт мелодии. Роль гармонии, например, ярко предстает в арии Левко «Спи, моя красавица» из оперы *Н. А. Римского-Корсакова* «Майская ночь».

Опыт и длительный поиск помогли человеческому слуху найти закономерности в организации самих аккордов. *Аккорды* должны иметь внутреннюю связанность и быть согласованными как друг с другом, так и с мотивами данной мелодии. Они делятся на две группы: *консонирующие* — звучащие слитно и согласованно и *диссонирующие* — звучащие резко, противоречиво. Эта противоречивость обнаруживается, когда аккордное трезвучие состоит не из родственных между собой звуков. Для разрешения противоречивости нужно, чтобы связывающий звук, называемый *тоникой аккорда,* стал бы родственным другим, имея хотя бы один общий с ними обертон.

Система одновременно возбуждаемых звуков, связанная между собой определенным родством, называется *ладом*. Лад состоит из устойчивого звука (тоники), к которому тяготеют несколько неустойчивых звуков. Так, в трезвучии *до-ми-соль* тоникой является звук *до*, его родство с двумя другими звуками снимает противоречие между ними, делает аккорд консонирующим.

Диссонирующие аккорды не имеют тонов совпадения (общих обертонов) и звучат жестко и неприятно. Однако и они наряду с консонирующими могут участвовать в создании гармонии. Консонирующие аккорды, следуя за диссонирующими, как бы устраняют их неустойчивость. Такое воздействие консонанса в отношении диссонанса называется *разрешением*.

Следовательно, определенные созвучия консонирующего и диссонирующего типов стали новым средством музыкальной выразительности, связанным с переходом от мягкости звучания к резкости и наоборот. Последовательность таких переходов имеет также большое значение. Как в мелодии существует взаимное тяготение звуков, так и в гармонии обнаруживается тяготение одних аккордов к другим.

Гармония подчинена мелодии. Мелодии спокойного лирического плана требуют мягкого, согласованного сопровождения. Создание мелодических образов связано со сложным сочетанием консонирующих аккордов. В сценах же трагических, рисующих катастрофические столкновения и внутренние конфликты, мелодии часто сопровождаются жесткими, раздражающими сочетаниями аккордов. Отсюда становится понятным, что, увеличивая роль многоголосия, можно добиться еще более яркого звучания, более глубокого изложения музыкальной мысли, сделать музыку еще более выразительной.

Уже в хоровом исполнении песни часто сплетаются две и более самостоятельных мелодий. Созвучия, складывающиеся при слиянии и расхождении ряда мелодических линий, создают особую яркость, вносят такое разнообразие в звучание, которое не может проявляться при одноголосном исполнении мелодии. В многоголосии обнаруживается *полифонический склад* данного сочинения, обладающий своей особой выразительной силой.

Полифонический склад музыки создает то противосложение двух мелодий, связанное с движением одной из них вверх, другой вниз, то смену одной из мелодий на другую, то сопоставление и столкновение противоречивых тем. Это позволяет подчеркнуть особый подтекст мысли, создать двуплановость изображаемого события или отобразить борьбу двух противоположностей.

3.8. Функции музыки в кино и на телевидении

Музыка, будучи по своей природе выразителем эмоционального начала, в единстве с другими видами искусства способна передать то, чего не могло сделать каждое из них в отдельности. В песне, романсе, арии она придает словам веселую легкость или отяжеляет их грустью. В движения балетного танца она способна вдохнуть жизнь, и танец начинает рассказывать о событиях, людях, их действиях и переживаниях. Во взаимодействии со словом и движением музыка создает оперу с волнующими образами героев. Однако особую силу это взаимодействие приобретает в художественных кино- и телефильмах. Выступая в сложном единстве со словом, шумами, создавая особый звуковой ряд, она в слиянии, сопоставлении и противопоставлении с изобразительным рядом создает в результате синтеза новое качественное начало — ряд звукозрительный.

Сам факт применения музыки может создать большой художественный эффект. В фильме «Щит и меч» (режиссер *В. Басов*) узники фашистского подземелья встречают освободителей радостным криком. И вдруг умолкают — они услышали звуки музыки, от которой отвыкли за годы пленения. Эффект ее воздействия создает огромное впечатление.

Музыка в фильме может расширить рамки изображения, рассказать о том, чего нет на экране. Мелодия «Варшавянки» сразу же связывает события с революционным движением, мелодия песни

«Священная война» — с годами борьбы с немецкими захватчиками, песня Максима из фильма-трилогии о Максиме (режиссеры *Г. Козинцев, Л. Трауберг*) переносит в годы дореволюционного прошлого. Звуки шарманки или фисгармонии могут подсказать не только время, но и место действия.

Используя звукоподражание, музыка способна возбудить конкретные чувства. При показе сцены грозы, глади озер она может вызвать чувство страха или покоя. Сопровождая картины природы, погони, сцены любви, она придает особую характерность пейзажу, усиливает эффект движения, раскрывает глубину чувств. В фильме «Большой вальс» (режиссер *Ж. Дювинье*) Иоганн Штраус со своей возлюбленной едут по Венскому лесу. Утро. Доносятся звуки пастушьего рожка, слышен топот копыт. Эти звуки, чувства, навеянные природой, рождают у композитора мелодию. Нотка за ноткой — и, легко слагаясь, над лесом звучит знаменитый вальс.

Музыка часто отображает воспоминания героев. В фильме «Большая семья» (режиссер *И. Хейфиц*) есть сцена дежурства деда Матвея Журбина. Ночь. В кресле директора завода сидит старый рабочий. В тишину кадра вдруг вторгается мелодия песни «Смело мы в бой пойдем...», и зритель понимает — в душе старика звучит эта песня, а в памяти возникают картины его революционного прошлого.

Музыка позволяет подслушать мысли героя, представить их как внутренний его монолог. Так звучат песни, исполняемые артистами А. Фрейндлих и А. Мягковым в фильме «Служебный роман». Они звучат за кадром, на фоне осенней увядающей природы. Как писал режиссер фильма *Э. Рязанов,* «эти песни могли звучать в их душах», помогая «понять внутренний мир и духовное богатство... героев». И песни Дениса Давыдова в фильме «Эскадрон гусар летучих» (режиссеры *С. Степанов и Н. Хубов*) хотя и исполняются самим героем в кадре, также являются выразителями его мыслей. Они звучат как поэтическое откровение, как исповедь героя-поэта.

Часто музыка теряет свою однозначность, не совпадает, расходится с изображением. *Сопоставление* двух музыкальных тем создает впечатление контраста, двуплановости событий, позволяет придать другой смысл показываемому на экране событию, вскрыть подтекст. Две линии, обозначенные в фильме «Баллада о солдате» (режиссер *Г. Данелия*) народными напевами, раскрывают противоречивые чувства Алеши Скворцова: его светлые мечты и душевное беспокойство.

Особую остроту приобретает умелое *противопоставление* музыки и изображения. Когда напряженная ситуация, создаваемая изображением, сочетается, казалось бы, со случайной инородной мелодией, эффект может быть потрясающий. В фильме «Гусарская баллада» (режиссер *Э. Рязанов*) шутливая песенка «Жил-был Анри Четвертый» сначала согласуется с картинами легкого продвижения французских войск, а потом вступает в противоречие, становится ярким обличающим фактором рядом с изображением страшной гибели наполеоновской армии.

Японский режиссер *Акира Куросава* пишет о согласии «использовать веселую музыку вальса «Кукушка» в самом грустном эпизоде фильма («Пьяный ангел»)... До сих пор музыка «приплюсовывалась» к изображению, а мы решили ее «помножить» на изображение... Наиболее впечатляющее звучание киномузыки достигается путем *контрапункта*». Этот прием был применен им и в фильме «Бездомный пес». В нем сцена, изображающая захват жалкого, измученного преследованием преступника, сопровождается бесхитростной детской песенкой «Бабочка», которую поют случайно проходящие рядом и не видящие этой сцены ребятишки.

Важную драматическую функцию выполняет в фильме музыка, выступая в качестве *лейтмотива, лейтобраза*. Таким лейтмотивом стала, например, песня «Широка страна моя родная» в фильме «Цирк» (режиссер *Г. Александров*). Лейтмотив создает канву для всего фильма, на которую легко ложатся разнохарактерные сцены, или выделяет в нем отдельный образ, связанный с повторяющейся яркой мелодией.

Музыка часто выполняет широкую обобщенную роль, «выражая авторскую оценку событий,— писал *С. Эйзенштейн* — она впитывает в себя вереницу кадров, создает собирательный звукозрительный ряд» [39]. Таким объединяющим началом в фильме «Александр Невский» он сделал песню «Вставайте, люди русские». Множество кадров она искусно подчинила всеобщей идее спасения родины. Такой же носительницей общей идеи является тема отца Гамлета («Гамлет», режиссер *Г. Козинцев*) — через весь фильм проносит она мысль о всепобеждающей справедливости.

Музыка в кино и телефильмах может быть *реалистичной* — звучат только те инструменты, которые зритель видит или только что видел на экране, — и *условной*. Она может быть *прозаической* — усиливающей художественную роль изображения — или *поэтической* — выражающей настроение героя. Музыка выступает *согласованно*, в *сопоставлении* и *противопоставлении* с изобразительным рядом, объединяясь с речью и шумами. Она способна соединять и разъединять зрительный и слуховой ряд там, где это необходимо для усиления эмоции, вскрытия подтекста, для широкого музыкального обобщения.

3.9. Роль шумов в художественных фильмах и программах

Так же как речь или музыка, шумы могут вносить в фильм, теле- и радиопередачи большую семантическую и эстетическую информацию. Для этого их роль должна быть «гораздо значительнее рабского подражания натурализму» *(В. Пудовкин)* [6]. Второстепенные шумы не только мешают передать главное, но и являются лишними с психологической точки зрения. Важны только те шумы, которые дают интересную информацию, углубляют мысль, вместе с речью и музыкой или самостоятельно усиливают эмоциональность

передачи. Это является главным для человека, и только главное должно быть перенесено в программу художественной передачи.

Шумы в сочетании с речью используются часто для усиления драматизма, для раскрытия подтекста. Например, в сцене встречи Даши и Телегина (фильм «Сестры», режиссер *Г. Рошаль*) в их разговор врывается грохот военного эшелона как грозное напоминание о войне и разлуке. Шумы усиливают напряженность обстановки. Так, стук вагонных колес по рельсам, далекие артиллерийские выстрелы в сценах срочной эвакуации завода (фильм «Особо важное задание», режиссер *Е. Матвеев*) создают настроение приближающейся опасности, подчеркивают самоотверженность людей, спасающих оборудование. Шумы совместно с музыкой повышают эмоциональное воздействие на слушателей. Мерный топот копыт, скрип коляски, на которой едет Штраус, в кадрах «Большого вальса», сплетаясь с рождающейся музыкой, создают мягкую, пасторальную картину природы. И тот же топот, только бешеный, вместе с вихревой музыкой создают атмосферу напряженного боя или погони (фильмы «Огненные версты», «Чапаев», «Тачанка с юга» и др.). Или финальные кадры телефильма «Подпольный обком действует» (режиссер *А. Буковский*), где под звуки марша шагают герои-партизаны и в такт музыке серебром звенят их многочисленные ордена и медали.

Из слияния шумов создают своеобразную мелодию, часто становящуюся лейтмотивом всего фильма. Так, из свиста и завывания ветра родилась шумомузыка в эпизодах фильма «Сказание о земле Сибирской» (режиссер *И. Пырьев*). Она же придала особую яркость кадрам с провинившимся солдатом в фильме «Сорок первый» (режиссер *Г. Чухрай*).

По шумам можно судить о месте и времени действия (вечевой набат, звон шпор, заводские гудки). Звук метронома, например, переносит слушателей в грозные годы Великой Отечественной войны. Шумы могут напоминать о героях даже тогда, когда их нет в кадре. Летчик Маресьев в фильме «Повесть о настоящем человеке» (режиссер *А, Столпер*), например, хорошо «узнается» по скрипу его протезов. Ускорение шума поезда вызывает волнующее предчувствие неминуемого крушения, простой стук топора может вызвать чувство жалости, подобное тому, которое возникает в финале чеховской пьесы «Вишневый сад».

Шумы способны самостоятельно вскрывать чувства и переживания героев целого игрового эпизода. Пример тому — эпизод погони фашистских танков за автомобилем с руководителями завода в фильме «Особо важное задание». Пушечные выстрелы, вой мотора, крики, взрыв снаряда и падающая фигура инженера Лунина. Здесь драматизм эпизода с предельной выразительностью был передан только изобразительными средствами и шумами.

В художественных передачах не должно быть места шумам иллюстративного характера. В программу нужно включать только те из них, которые несут в себе дополнительную логическую или эстетическую информацию и способны непосредственно или вместе с речью и музыкой воздействовать на мысли и чувства зрителей. Шу-

мы должны передавать подтекст явлений и событий, придавать им образный характер, способствовать раскрытию внутреннего облика героев, усиливать напряженность действий. Как и в случае речи и музыки, эмоциональное воздействие может достигаться при смысловом совпадении и несовпадении, столкновении и противопоставлении изображения и звука. Шумы вследствие своей конкретности и яркой характерности могут приобрести высокую художественную выразительность. Удачный их выбор определяется стремлением звукорежиссера к постоянному творческому поиску.

3.10. Значение технических средств в передаче художественных звучаний

Звукорежиссер, применяя современные технические методы, может не только передать художественные особенности музыки и речи, но и увеличить их художественную ценность за счет новых выразительных средств. Известно, например, что естественность звучания заметно повышается, если вместе с изменением масштаба изображения, расстояния до исполнителя или с переходом из одного помещения в другое соответствующим образом изменяется время реверберации. Художественная задача такого плана хорошо решается с помощью техники.

Звукопередающая аппаратура позволяет замедлить или ускорить передаваемую речь, превратить ее в бормотание, как это сделано в приводимом примере из фильма «Иваново детство», где речь гитлеровских солдат передает не мысль, а их грубость. Аппаратура позволяет изменять тональность голоса, понижая (например, в кадрах, где говорит тень отца Гамлета) или повышая его. Искусственное понижение тональности дает эффект большей громкости. В том и другом случае сохраняется лучшая разборчивость речи, чем когда нужный эффект достигается форсированием или ослаблением голоса. Изменяют тональность также и для коррекции тембра голоса, который зависит от настроения исполнителя, времени и пр. Искусственное изменение тембра создает новые элементы речевой выразительности. Усиливая низкочастотные составляющие голоса, его можно сделать бархатистым, мягким, глухим, придать ему оттенок угрозы. Усиление высокочастотных делает его звонким и резким со все бо́льшим подчеркиванием шипящих и свистящих звуков. При двустороннем ограничении частотного диапазона звучание речи становится тусклым и плоским, характеризуя подавленность, безразличие или обреченность говорящего.

Изменение звуковых параметров, осуществляемое с помощью техники, будет сказываться и на выразительности музыкальных передач. Так, изменение времени реверберации, создающего впечатление о размерах помещения или об удаленности источника звука, для музыки оказывается даже более важным, чем для речи. Важной является также возможность изменения уровня громкости, динамики звучания и усиления основной форманты голоса или инструментов, делающая звучание более ярким и особенно характерным. Тех-

нические приемы позволяют перейти от шумов к музыке и обратно, создавать новые образы путем искажения музыкальных звучаний, выделять звучание отдельных инструментов в ансамбле. В фильме «Бег иноходца» (режиссер *С. Урусевич*), например, замедленная передача пения птиц воспринимается как новая мелодия. В фильме «Александр Невский» искаженный звук валторны передает паническое бегство тевтонских рыцарей.

С помощью техники можно, записывая оркестр малого состава, создать впечатление о звучании большого оркестра, получить хорошую прозрачность оркестрового звучания, нужный звуковой баланс, изменить плановое размещение музыкальных групп в оркестре. Этого можно добиться методом *последовательного наложения*, когда звучания голоса солиста и отдельных групп инструментов, будучи записанными порознь, совмещаются в процессе перезаписи в наиболее живом и образном сочетании друг с другом и с изображением. Каждая из компонент суммарного звучания может, помимо этого, обогащаться своими индивидуальными чертами (подчеркнутой формантой, своеобразным тембром, изменением тональности или уровня громкости).

Таким образом, технические средства звукопередачи могут выполнять не только пассивные функции носителя и передатчика звуковой информации, но и функцию активного воздействия на сигналы в целях повышения художественной выразительности этой информации. Задача звукорежиссера расширяется в направлении создания новых выразительных средств и умелого их использования для более глубокого раскрытия художественных образов.

Так складывается единство творческого и технического начала в кинематографе. Его частным проявлением является деятельность звукорежиссера, для которого поиск и постановка художественных задач неотделимы от их решения техническими средствами.

Глава 4.

СЛУХОВОЕ ВОСПРИЯТИЕ И ЕГО СВЯЗЬ С АКУСТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СИГНАЛОВ

4.1. Восприятие интенсивности сигналов

Как известно, основные параметры ощущения (громкость звука, высота тона и др.), будучи нелинейно связанными с соответствующими параметрами раздражения, зависят еще и от других его параметров. Так, громкость звука нарастает непропорционально увеличению интенсивности сигнала, и на эту связь дополнительно влияет частота и длительность последнего.

Трансформирующее действие системы восприятия показывает, что информация, которую несут с собой сигналы, создаваемые натуральными источниками звука, заметно видоизменяется и может быть избыточной. По степени же избыточности можно найти оптимальные технические характеристики электроакустического тракта. Кроме того, выявление тех акустических параметров слухового восприятия, которые повышают семантическую и эстетическую информативность, позволяет творчески использовать систему управления сигналами в процессе звукопередачи.

Слуховой аппарат воспринимает уровни силы звука в диапазоне до 120÷130 дБ. В эти пределы вполне укладываются сигналы всех реальных источников звука. Однако для правильного суждения о связи ощущения звука — его громкости с раздражением, т. е. с уровнем силы звука, нужно помнить, что изменение чувствительности слухового аппарата далеко не точно подчиняется логарифмическому закону, принятому при построении кривых одинаковых уровней громкости (пунктирные линии на рис. 4.1). Фактически субъективно воспринимаемая громкость (в сонах), как видно по кривым, показанным сплошными линиями, при малых уровнях силы звука изменяется медленнее, а при больших — быстрее, чем уровень громкости, измеряемой в фонах. Мелким пунктиром показаны изменения кривых уровней громкости для случая диффузного звукового поля, т. е. для звукопередач, ведущихся из помещений.

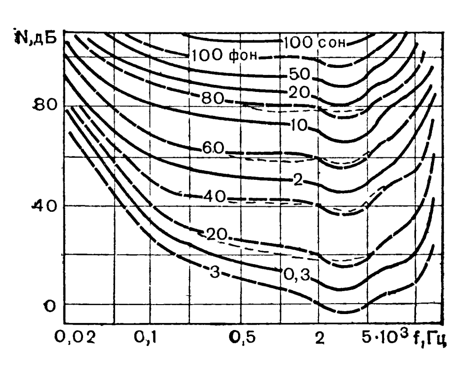


Рис. 4.1. Сравнение кривых равного уровня громкости (в фонах) и субъективной громкости (в сонах)

Как видно по рис. 4.1, для мощных источников различие между субъективной громкостью и ее уровнем невелико,

тогда как для источников малой мощности это различие становится очень большим. Непропорциональное увеличение громкости вместе с повышением уровня заметно сказывается на натуральных сигналах в том, что слух как бы подчеркивает усиленные по уровню формантные области, делая речь более четкой, увеличивая носкость голоса, выделяя характерные особенности каждого из музыкальных инструментов. Очевидно, это свойство слуха может быть использовано при управлении сигналами в процессе звукопередачи.

Кривые рис. 4.1 показывают, что соотношение между объективным акустическим стимулом и субъективно воспринимаемой громкостью не является постоянным при различных частотах сигнала. Сигнал натуральных источников представляется в виде некоторого набора чистых тонов. Поэтому важно установить, какие изменения претерпевают эти сигналы при изменении их общей интенсивности.

При высоких уровнях силы звука (80—90 дБ) кривые равной громкости почти параллельны оси частот и частотные составляющие сложных сигналов претерпевают наименьшие изменения громкости. Воспроизведение таких сигналов с пониженным уровнем усиления, как это бывает при слушании радиопередач в домашних условиях, вызывает потери низко- и высокочастотных составляющих. Более слабые сигналы с уровнями 30÷60 дБ слуховой аппарат воспринимает с ослаблением низких и высоких частот. Увеличение же громкости за счет общего усиления, как это практикуется при звукопередаче в кинематографе, нарушает естественные для таких сигналов соотношения, обнаруживаемые слухом как подчеркивание низких и высоких частот. Следовательно, и усиление и ослабление натуральных сигналов при записи или воспроизведении звука требует соответствующей частотной коррекции.

Субъективно воспринимаемая громкость нескольких тонов, а следовательно, и сложных сигналов зависит от их когерентности. Если они некогерентны, что наблюдается, когда частоты одновременно звучащих тонов отличаются не менее чем в четыре раза (на две октавы), то субъективная громкость их будет арифметически складываться [39]. Это соответствует таким натуральным источникам, которые имеют только нечетные гармонические составляющие (например, кларнет), или двойным созвучиям, взятым, например, на фортепиано. Когда же различие в частотах невелико и оба тона лежат в пределах одной критической полосы слуха Δf, значение которой можно определить по рис. 4.2, складываются уже не громкости, а только соответствующие им звуковые давления, что дает максимальное увеличение уровня громкости только на 6 фон. И в этом случае реальные сигналы по сравнению с чистыми тонами

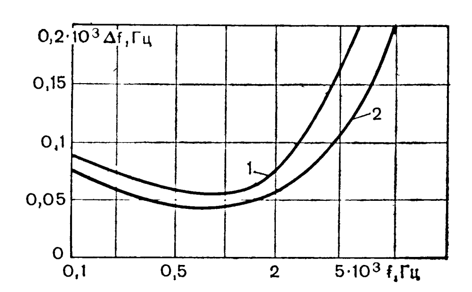


Рис. 4.2. Зависимость критической полосы слуха Δf от частоты сигнала при слушании одним (*1*) и двумя (*2*) ушами.

имеют увеличение громкости особенно для тех источников, у которых амплитуды первых гармоник заметно больше, чем у основной частоты (скрипка, валторна и др.).

Таким образом, реальные сигналы имеют громкость бо́льшую, чем близкие к ним чистые тоны, что подтверждается экспериментальными кривыми зависимости громкости чистого тона (*1*), равномерно воздействующего (*2*) и белого (*3*) шума от уровня звукового давления (рис. 4.3).

Очевидно, и для групповых источников будут сохраняться те же закономерности, которые существуют для одиночных или для груп-

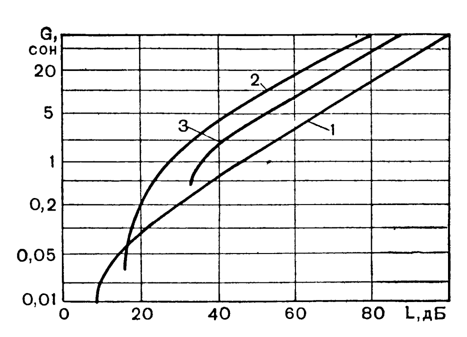


Рис. 4.3. Зависимость громкости чистого тона (*1*) и сложных сигналов (*2, 3*) от уровня звукового давления

Рис. 4.4. Кривые порога слышимости тона при маскировке белым шумом (*В*) узкополосными шумами (*А, Б*) и звуками скрипки (195 и 1500 Гц)

пы чистых тонов. Следовательно, каждое удвоение числа одинаковых источников (например, в унисон играющих скрипок) будет приводить к увеличению их уровня громкости не более чем на 6 фон. Если же источники неодинаковы и их звучания заметно отличаются по частоте (например, скрипка и контрабас), то при одновременной игре громкости таких инструментов могут складываться.

В практике телевидения и кинематографа встречаются передачи, в которых одиночные или групповые источники должны звучать на фоне шумов и других мешающих звуков, чаще всего *негармонического характера*. В этом случае фоновые сигналы будут полностью или частично маскировать основной сигнал. Степень маскировки зависит от уровня маскирующего сигнала и его характера. По своему характеру маскирующие звуки могут быть близкими к белому или узкополосному шуму, представляться созвучиями или чистыми тонами. Граница, у которой полезный сигнал начинает прослушиваться на фоне мешающего, называется *порогом слышимости при маскировке*. Он лежит на несколько децибел выше уровня полезного сигнала.

На рис. 4.4 показаны кривые порога слышимости тона при маскировке белым и узкополосным шумом при средних частотах последнего — 250 (*А*) и 1000 Гц (*Б*) — и уровнях 40, 60 и 80 дБ. Пороговые кривые для белого шума (*В*) параллельны, имея подъем

на 10 дБ в пределах частот от 1000 до 10 000 Гц. Это указывает на бо́льшее маскирующее действие высокочастотных составляющих белого шума по сравнению с низкочастотными. Маскирующее действие низкочастотных шумовых полос шириной 160 Гц и уровнем 60 дБ охватывает частоты в пределах от 80 до 1000 Гц, тогда как полосы высокочастотных шумов с теми же параметрами оказывают маскирующее действие в более узком диапазоне частот — от 500 Гц до 2000 Гц. Увеличение уровня маскирующего сигнала заметно расширяет зону маскирующего действия в сторону высоких частот.

Волнистыми линиями на рис. 4.4 показаны пороги слышимости для случаев, когда маскирующими сигналами являются тоны скрипки с основными частотами 195 Гц и 1500 Гц. Судя по этим кривым, эффект маскировки сказывается на частотном спектре полезного сигнала, начиная с основной частоты маскирующего тона. Отсюда следует, что ширина полосы маскировки будет возрастать по мере понижения этого тона. Расширение маскирующего действия низкочастотных сигналов в известной мере учитывается при установлении численности отдельных групп исполнителей. Так, в симфоническом оркестре число виолончелей уменьшают по сравнению со скрипками. Так же поступают и при определении количества низкочастотных ударных инструментов в оркестре и соотношения мужских и женских голосов в хоре. Эту особенность маскировки следует принимать во внимание и при повышении уровня усиления воспроизводимой музыки, так как уровень низкочастотных сигналов при этом заметно увеличивается. При наложении узкополосного шума на формантные области музыкальные сигналы будут терять свою узнаваемость, а речевые — понятность отдельных звуков. Как показывает опыт, отношение уровня шума $N_{ш}$ к уровню полезного сигнала N для хорошего или удовлетворительного восприятия речи должно быть не больше $0{,}5 \div 0{,}7$.

Нужно отметить, что слуховой аппарат при восприятии сигналов высокого уровня привносит свои, так называемые *субъективные искажения*. Так, при уровне сигнала 100 дБ первая и вторая субъективные гармоники достигают уровня соответственно 85 и 70 дБ.

В заключение можно сделать следующие общие выводы.

1. Диапазон уровней интенсивности звука, воспринимаемого слухом, равен $120 \div 130$ дБ, что достаточно для приема полного динамического диапазона любого реального источника звука.

2. Резкое повышение громкости при увеличении уровня силы звука способствует подчеркиванию формант, что улучшает четкость речи и делает звучание каждого натурального источника более характерным.

3. Уменьшение или увеличение уровня усиления при передаче сложных сигналов вызывает соответственно потери или подчеркивание их низко- и высокочастотных составляющих.

4. Субъективная громкость натуральных сигналов выше, чем у чистых тонов той же интенсивности, и так же, как для групповых источников, или несколько увеличивается при близком расположе-

нии их частотных составляющих, или складывается, если они размещаются далеко.

5. Увеличение уровня шумовых сигналов повышает их маскирующее действие. Наиболее опасными являются низкочастотные шумы или тоны, имеющие широкую полосу маскировки.

4.2. Восприятие частоты сигнала

По кривым рис. 4.1 видно, что орган слуха сохраняет чувствительность к сигналам, частоты которых лежат в широких пределах от 30 до 20 000 Гц. Такой частотный диапазон слухового восприятия почти полностью охватывает частотные диапазоны натуральных источников звука (см. рис. 2.22). Вместе с тем следует отметить, что при увеличении частоты постоянного по уровню сигнала его громкость сначала нарастает до некоторого максимума у средних частот, потом падает. Орган слуха как бы осуществляет частотную коррекцию на низких и высоких частотах, причем тем бóльшую, чем ниже уровень сигнала. Подтверждением этого вывода являются кривые рис. 4.5, показывающие, как трансформируются спектральные кривые мужского (*1*) и женского (*2*) голосов в процессе слухового восприятия. Кривые *1а* и *2а*, построенные в единицах громкости, убеждают, что спектр сложного сигнала воспринимается с заметными потерями низкочастотных составляющих.

Изменение частоты сигнала воспринимается слухом как изменение высоты звука. Высота звука, будучи, как и громкость, субъективным качеством, зависит не только от частоты сигнала, но и от ряда дополнительных факторов, таких, как громкость, длительность, спектральный состав звучания. Высота звука сложного сигнала определяется самой низкой (основной) частотой, или присутствующей в самом сигнале, или обусловленной формой его огибающей кривой. Если огибающая высокочастотного сигнала изменяется с частотой 40÷200 Гц, то сигнал воспринимается как звук, соответствующий частоте огибающей.

Нужно подчеркнуть, что зависимость между частотой сигнала и высотой звука, т. е. между раздражением и ощущением, близко соответствует общим для слуха закономерностям. Так, субъективный масштаб восприятия различных по частоте сигналов с достаточной точностью отвечает логарифмическому, и повышение звука на один и тот же интервал (на октаву, тон) происходит при увеличении частоты в одно и то же число раз (в 2 и 1,12 раза). Как показано сплошной линией на рис. 4.6, для всех сложных гармонических сигналов — речевых и музыкальных — изменение ступеней гармонической высоты звука ($K_г$), соответствующих определенному музыкальному интервалу (например, октаве), происходит пропорционально изменению частоты сигнала в логарифмической мере. Такое деление на интервалы, как известно, лежит в основе музыкального строя. В случае простых гармонических сигналов связь между их частотой и высотой звука, называемой *мелодической,* показана на рис. 4.6. пунктирной линией. Можно видеть, что эта кривая, совпадая снача-

ла с кривой гармонической высоты, начинает потом заметно отклоняться от нее. При девяти гармонических октавах число мелодических октав ($K_м$) сокращается до 4,3, а мелодическая высота звука (в мелах) на интервале частот от 1000 до 10 000 Гц увеличивается чуть больше чем на одну октаву.

Влияние интенсивности сигнала на высоту воспринимаемого звука выражается в том, что увеличение интенсивности простого гар-

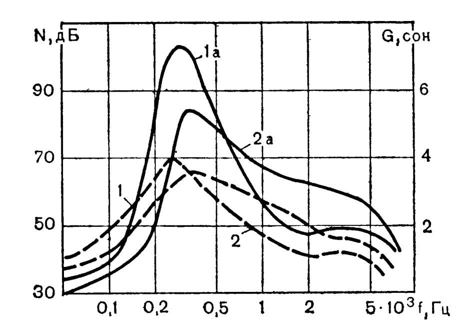


Рис. 4.5. Спектры мужского (*1*) и женского (*2*) голосов, выраженные в единицах громкости (*1a*, *2a*)

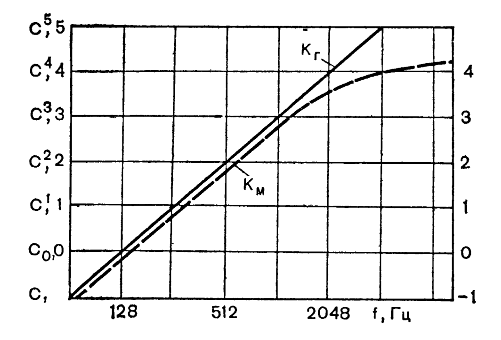


Рис. 4.6. Зависимость гармонической ($K_г$) и мелодической ($K_м$) высоты звука (с пооктавным делением) от частоты; по вертикали указаны номера октав

монического сигнала, при его частоте меньшей 2000 Гц, сопровождается понижением воспринимаемого звука, а при частоте, большей 2000 Гц, — повышением его. Такая же зависимость, хотя и менее заметно, обнаруживается и для сложных сигналов. Кроме того, сложные сигналы по сравнению с простыми той же интенсивности и частоты воспринимаются слухом не только как более громкие, что уже отмечалось, но и как более высокие.

Сложные сигналы воспринимаются органом слуха как единый звук, высота которого определяется основной частотой с дополнительной окраской (тембром), зависящей от частоты и амплитуды гармонических составляющих. Способность слуха различать тембр

позволяет воспринимать сигналы с большим разнообразием оттенков. Звучание каждого из инструментов и голосов благодаря характерным для них формантам становится многокрасочным, своеобычным и хорошо узнаваемым. Различия в тембре определяются в основном низко- и среднечастотными составляющими сигнала, следовательно, и большее разнообразие тембров связано с сигналами, лежащими в нижней части частотного диапазона. Сигналы же, относящиеся к верхней его части, по мере повышения все больше теряют свою тембральную окраску, что обусловлено постепенным уходом их гармонических составляющих за пределы слышимых частот.

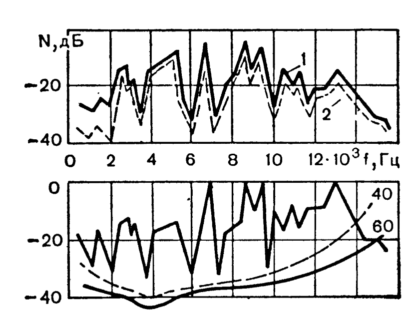


Рис. 4.7. Восприятие спектра звучания треугольника при уровне 60 дБ (*1*) и 40 дБ (*2*)

В силу неодинаковой чувствительности слуха на разных частотах изменение уровня сигнала порождает изменение тембра звучания натурального источника. Это видно из рис. 4.7, на котором помещен спектр звучания треугольника. Изменение его уровня отражается на спектре, а следовательно, и на тембре звучания.

Так как звучание натурального сигнала чаще всего воспринимается в помещениях, то наличие в них достаточно диффузного звукового поля, как это видно по кривым рис. 4.1, вычерченным мелкими штрихами, способствует выпрямлению кривых равной громкости и лучшему восприятию высоких частот.

В результате ознакомления с частотным восприятием сигнала можно прийти к некоторым заключениям.

1. Основные частоты и гармоники натуральных источников сигнала почти полностью размещаются в диапазоне воспринимаемых частот.

2. Музыкальные интервалы и соответствующие им высоты звука связаны между собой логарифмической зависимостью.

3. Присутствие в сигналах натуральных источников характерных для них гармоник воспринимается слухом как специфическая окраска, очень разнообразящая звучания, делающая различимыми их источники. Сигналы больших уровней изменяют тембральную окраску благодаря гармоникам, обусловленным самим слуховым аппаратом.

4. Неравномерность чувствительности слухового аппарата по частоте приводит к тому, что низко- и высокочастотные составляющие натуральных сигналов по мере их приближения к границам восприятия уменьшаются по громкости, а для некоторых из них (например, для флейты) и совсем не воспринимаются. В соответствии с этим решающее влияние на тембр приобретают те частотные составляющие, которые лежат ближе к средней области частотного диапазона.

5. Чем выше по уровню становится сложный сигнал, тем больше при восприятии усиливаются низко- и высокочастотные его составляющие. Это обнаруживается в том, что основная частота воспринимается несколько изменившейся по высоте, а влияние гармоник и формант на тембр звука расширяется в сторону этих частот.

6. Повышение диффузности звукового поля способствует более равномерному восприятию частот в полосе 500÷5000 Гц.

4.3. Временны́е характеристики слухового восприятия

Слуховой механизм, как и любая другая колебательная система, является инерционным, и, следовательно, при возбуждении у него

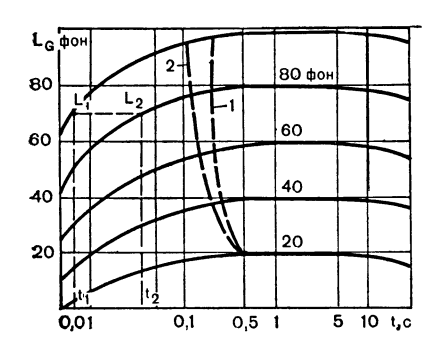


Рис. 4.8. Кривые, ограничивающие зону интегрирующего эффекта для простых (*1*) и сложных (*2*) звуков

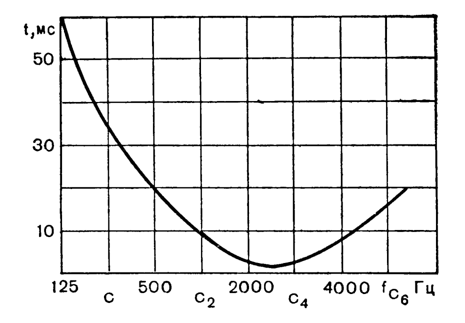


Рис. 4.9. Частотная кривая времени, необходимого для слухового восприятия высоты тона

должны возникать переходные процессы. Время нарастания и затухания воспринимаемого звука будет зависеть от особенностей этого механизма и некоторых параметров действующего на него сигнала.

Для простых сигналов с уровнями громкости 20, 40, 60, 80 и 100 фон эти уровни (рис. 4.8) устанавливаются не сразу, а в течение около 100 мс. В процессе нарастания менее громкий звук (при L_2=80 фон) может восприниматься как одинаковый по сравнению с другим более громким (L_1= 100 фон) при условии, что длительность этих звуков будет связана неравенством $t_1 < t_2$. Это свойство слуха носит название *интегрирующего эффекта.* Опыты показали, что указанное свойство может быть выражено в виде равенства $I \cdot t = \text{const}$ и сохраняется в пределах малых времен звучания *t*, ограниченных на рис. 4.8 для простых сигналов кривой *1*, а для сложных — кривой *2* [30]. Справа от этих кривых громкость звука становится независимой от длительности сигнала.

Рассматривая кривые процесса нарастания для таких музыкальных инструментов, как скрипка (см. рис. 2.8) или орган (см. рис. 2.14) совместно с кривыми рис. 4.8, можно заметить, что слух на начальном этапе значительно видоизменяет характер кривых нарастания гармонических составляющих данных инструментов. Все

они для слуха растут с большей скоростью, чем в действительности, и опережающие гармоники дополнительно подчеркиваются за счет интегрирующего эффекта. Слух не разрушает своеобразную картину процесса нарастания, характерную для каждого натурального источника звука, а делает ее более четкой. И эта четкость, как показывает эксперимент, очень влияет на тембр звучаний.

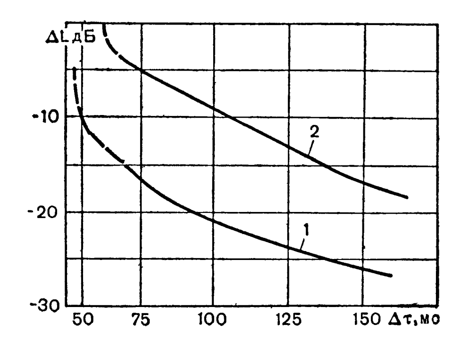


Рис. 4.10. Различия в уровнях ΔL и во времени прихода $\Delta\tau$ — двух сигналов, при которых звуки сливаются (*1*) или создают эхо (*2*)

Инерционность слуха выражается и в том, что, как это видно по графику рис. 4.9, для определения высоты тона слуху требуется некоторое зависящее от частоты время. Это время, особенно для низких частот, находится в пределах того начального этапа звучания, которое связано с восприятием тембра. Отсюда можно предположить, что инерционность может повлиять на окраску звучания.

При прекращении сигнала он будет восприниматься слухом как постепенно затухающий со скоростью примерно 10 фон за 150÷÷300 мс. Это время, называемое *постоянной времени слуха,* изменяется в зависимости от характера сигнала и его уровня интенсивности. Замедленное затухание воспринятого звука приводит к тому, что идущий за ним с опозданием на время меньше 50 мс второй звук, одинаковый по уровню, будет маскироваться первым и казаться его продолжением. Если первый звук по громкости больше второго, его маскирующее действие будет происходить при времени запаздывания, большем 50 мс. Различие во времени запаздывания, при котором будет происходить слияние звуков, отличающихся по уровню на ΔL, показано на рис. 4.10 (кривая *1*).

Таким образом, затухание, обусловленное слухом, накладываясь на затухание самого сигнала, делает этот процесс несколько более продолжительным. Это усиливает взаимную маскировку звуков и способствует слитному восприятию одинаковых по тональности сигналов, звучащих с интервалами в пределах до 150 мс. Явление слитного восприятия усиливается еще и тем, что значительная часть повторных сигналов, обусловленных отражением энергии от поверхностей помещения, становятся при восприятии неотделимыми от исходных сигналов и повышают их общую громкость. Все это неодинаково сказывается на качестве воспринимаемого звучания. Так, при длительном затухании быстрая речь будет терять четкость, а распевные звуки органа приобретут дополнительную красочность. Отсюда следует, что переходные процессы тесно связаны с другим временны́м параметром звучания — его темпом.

Временны́е процессы имеют большое значение при игре нескольких инструментов в унисон. Некоторое различие во времени атаки

и затухания, в длительности звука каждого из инструментов, которые неизбежны при такой игре, создают особую выразительность и тембральную насыщенность совместного звучания. Это хорошо обнаруживается, например, при унисонном звучании скрипок.

Опыты показывают, что при длительном воздействии сигнала чувствительность слуха постепенно снижается, и тем больше, чем выше громкость звука (см. рис. 4.8). Обнаруживаемое снижение чувствительности связано с реакцией слуха на перегрузку, т. е. с естественной его адаптацией. После паузы чувствительность слуха восстанавливается, поэтому новые сигналы кажутся очень громкими.

Сказанное позволяет сформулировать ряд общих положений.

1. Слух суммирует звуковую энергию, поступающую от источника, в течение 50 мс. Это способствует слиянию звучаний отдельных источников в единое звучание ансамбля, связывает его с акустикой помещения.

2. Нарастание и спадание громкости, воспринимаемой слухом, не соответствует ходу временны́х процессов для реальных сигналов. Это несоответствие — один из факторов, определяющих тембр звучания.

3. Тембр звучания в некоторой мере зависит от времени, необходимого слуху для определения высоты звука.

4. Тембр, являясь субъективным отображением сложности воспринимаемого звучания, не имеет количественной оценки и характеризуется терминами качественного порядка (красивый, мягкий, сочный и др.).

4.4. Пространственное восприятие сигналов

Орган слуха в состоянии определить пространственное положение одиночного или группового источника сигнала. Он находит направление на источник и расстояние до него, может выделить из многих звучание одного или группы одинаковых источников. Такая пространственная распознаваемость отдельных звучаний на фоне других усиливает прозрачность звучания, обусловливаемую прежде всего тембральными данными источника звука.

Выделяя каждый источник среди других, слух субъективно формирует их пространственное размещение. Однако вследствие небольшой точности определения пространственных параметров источников слуховое пространство всегда менее дифференцировано, чем пространство звуковых объектов.

Направление на источник. Неточность в определении направления на источник простого одиночного сигнала (кривая *1* рис. 4.11), воспринимаемая слухом как некоторая «размытость» слухового объекта $\Delta\varphi$, зависит от частоты этого сигнала и достигает $3 \div 5°$. Примерно такая же неточность характерна для узкополосного шума (кривая *2*) с шириной полосы, равной критической. Опыт, иллюстрируемый этими кривыми, проводился при размещении источника и органа слуха в одной горизонтальной плоскости и при нулевом угле приема, т. е. при нахождении источника на осевой линии слу-

хового аппарата. Если же изменять угол приема, то будет меняться и точность в определении направления. На рис. 4.11 показано, насколько нужно сместить источник простого (кривая 1′, 1″) или узкополосного (кривая 2′, 2″) сигнала относительно источника широкополосного шума, для того чтобы они казались идущими с одного направления. Параметром кривых являлся угол приема $\varphi_г$, равный 0° (1, 2), 40° (1′, 2′) и 320° (1″, 2″). Большое несовпадение кривых, отвечающих различным по типу сигналам и углам приема, убеждает в том, что сложные сигналы могут широко «размываться» и даже раздваиваться. Если эти данные отнести к таким сложным сигналам, как речь и музыка, то окажется, что свойственное слуху «размывание» способствует пространственному восприятию, расширяя слуховой объект по фронту. В вертикальной плоскости при восприятии речи незнакомого диктора размытость положения звукового источника увеличивается в 2÷4 раза и в среднем составляет 17°.

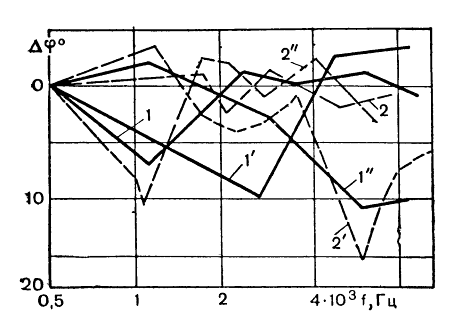


Рис. 4.11. Угол смещения Δφ, при котором непрерывный тон (1, 1′, 1″) и узкополосный сигнал (2, 2′, 2″) совпадают по направлению с источником широкополосного шума

Кроме того, если два одинаковых сигнала приходят к слушателю с разных направлений с некоторым сдвигом во времени, то они воспринимаются как один, находящийся между действительными источниками этих сигналов. При времени запаздывания $\Delta\tau=0$ они локализуются ровно посредине; при увеличении $\Delta\tau$ до 1,5 ÷ 2,0 мс, как это видно из рис. 4.12, возникающий кажущийся источник все больше смещается в сторону источника опережающего сигнала. Этот эффект используется в системе стереофонической передачи. Дальнейшее увеличение времени задержки вызывает расплывание кажу-

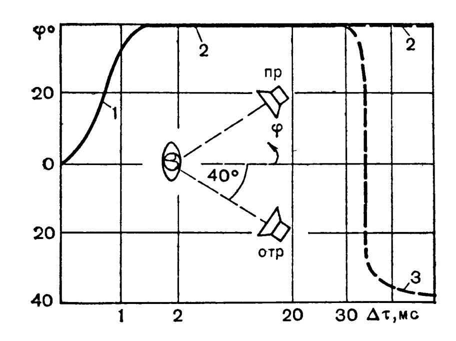


Рис. 4.12. Влияние отраженного сигнала на направление прихода прямого при малом (1), среднем (2) и большом (3) его запаздывании

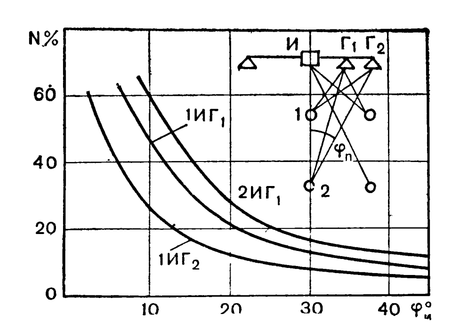


Рис. 4.13. Слитность восприятия зрительного и слухового объектов в зависимости от угла $\varphi_п$ между ними

щегося источника. В отношении прямого и первого отраженного в помещении сигналов это проявляется в том, что слух, не разделяя еще, начинает улавливать различие в направлении их прихода. Возникает впечатление объемности звучания, характерное для восприятия звука в закрытом помещении. Это происходит до $\Delta\tau = 30 \div 40$ мс, после чего происходит расщепление сигнала (см. пунктирный участок кривой) и отраженные сигналы начинают восприниматься как эхо.

В условиях стереофонического кинематографа важно, чтобы направления на слуховой и соответствующий ему зрительный объект

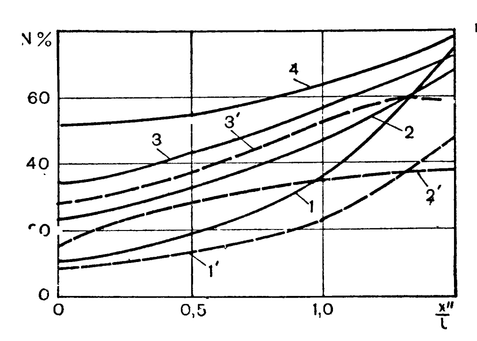


Рис. 4.14. Слитность восприятия зрительного и слухового объектов для экспертов, сидящих вдоль оси к центру экрана (*1, 2, 3, 4*) и перед его краем (*1', 2', 3', 4'*)

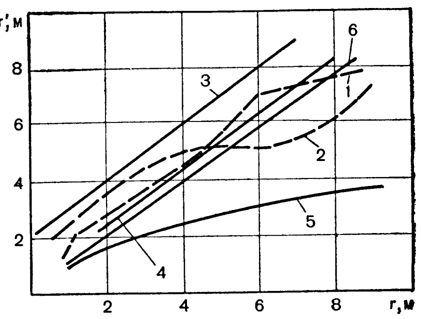


Рис. 4.15. Субъективная оценка расстояния r' при восприятии простого (*1*), импульсного (*2*) и речевого (*3, 4, 5, 6*) сигналов

совпадали, создавая единый звукозрительный образ. Это не всегда обеспечивается. В связи с этим нужно знать, при каком реальном несовпадении этих объектов они могут восприниматься слитно. Как видно из выполненных нами опытов (рис. 4.13), слияние зрительного и слухового объектов воспринимается все меньшим числом экспертов (N%) по мере увеличения действительного углового сдвига $\varphi_и$ между изображением (*И*) и источником звука (*Г*), причем это слияние происходит за счет «притяжения» последнего из них к первому. Так как каждый зритель (*1, 2*) воспринимает изображение звучащего объекта под своим углом, выяснялось, как их местоположение связано со слитным восприятием звукозрительного образа. На рис. 4.14 по оси абсцисс отложено относительное расстояние $\frac{x''}{l}$ от экспертов до центральной линии экрана, ширина которого равна $2l$. По оси ординат — то их относительное число (N%), для которого слияние достигается, несмотря на большое расстояние между изображением и соответствующим ему источником ($0,5l$). Кривые *1, 2, 3* и *4* на этом рисунке отвечают удалению экспертов вдоль оси к экрану соответственно на расстояние равное l, $2l$, $3l$ и $4l$; кривые *1', 2'* и *3'* — тем же удалением, но не вдоль оси, а вдоль нормали к краю экрана. Из рисунка следует, что «притяжение» слухового объ-

екта к соответствующему зрительному настолько велико, что при их фактическом несовпадении, равном 0,5l, от 40 до 80% экспертов воспринимают их слитно.

Расстояние до источника. Для фиксации положения слухового объекта кроме направления на этот объект нужно знать еще расстояние до него. Орган слуха определяет это расстояние по ряду косвенных признаков и с некоторыми погрешностями. Здесь также обнаруживается определенное размывание. В зависимости от того, мало́, значительно или велико расстояние до источника сигнала, субъективная его оценка меняется под воздействием различных факторов. Так, экспериментально было установлено, что если определяемые расстояния невелики (до 3 м), то их субъективная оценка почти линейно связана с изменением громкости перемещающегося по глубине источника звука. Ошибка же в оценке для ряда реальных речевых и музыкальных сигналов, включая такие, как звучание органа, составляет величину, равную 15÷20%. Дополнительным фактором для сложного сигнала является его тембр, который становится все более «мягким» и даже «тяжелым» по мере приближения источника к слушателю. Это связано со все бо́льшим усилением обертонов низкого по сравнению с обертонами высокого регистра, вызванным происходящим при этом повышением уровня громкости (см. рис. 4.1).

Для средних расстояний (3÷15 м) удаление источника от слушателя будет сопровождаться пропорциональным уменьшением громкости, причем в случае сложного сигнала это изменение будет одинаково относиться к основной частоте и к гармоническим составляющим. В результате происходит относительное усиление высокочастотной части спектра и тембр становится более ярким.

Если расстояние до источника звука больше чем 15 м, изменение уровней громкости гармонических составляющих сложных сигналов происходит непропорционально изменению этого расстояния. С его ростом будут пропорционально квадрату частоты расти потери энергии в воздухе. Увеличенная потеря обертонов высокого регистра приведет к снижению тембральной яркости. Таким образом, субъективная оценка расстояний для сложных сигналов связана с изменением его громкости и тембра. Кроме этого, влияют еще форма сигнала (простой, сложный), его вид и режим работы, о чем можно судить по рис. 4.15. На нем кривые *1* и *2* соответствуют восприятию простого (с частотой 150 Гц) и импульсного сигналов. Кривые *3*, *4*, *5* и *6* — восприятию речевого сигнала соответственно в режиме крика, повышенной громкости, дикторского чтения и шепота.

Как указывалось, в условиях закрытого помещения сигналы первых отражений, запаздывающие относительно прямого на 20÷40 мс, воспринимаются органом слуха как приходящие с различных направлений. Вместе с этим все большее их запаздывание создает впечатление о значительном удалении точек, от которых происходят эти отражения. Таким образом, по времени запаздывания можно судить об относительной удаленности фиктивных источников или, что то же, о размерах помещения.

Восприятие изменяющегося акустического отношения R, которое представляется в виде соотношения отраженной и прямой энергии в помещении, также вызывает представление об изменяющемся расстоянии. Чем больше будет это отношение, тем больше расстояние до источника. Этот эффект наиболее заметен при

$$R \leqslant 1 - 2.$$

Таким образом, пространственное восприятие звукового сигнала определяется рядом взаимосвязанных факторов.

1. Направление на источник сигнала, лежащий в горизонтальной плоскости, определяется слухом с некоторой размытостью. При размещении его на оси симметрии системы слуха размытость составляет угол в $1 \div 4°$. При смещении источника с этой оси она возрастает до $10 \div 12°$.

2. Эта размытость увеличивается в $2 \div 4$ раза, если источник звука расположен под углом к горизонтальной плоскости.

3. Сигналы от двух одинаковых источников сначала воспринимаются слитно, как идущие из точки, направление на которую зависит от времени прихода их к слушателю. Если сдвиг $\Delta\tau = 0$, то эта точка лежит на средине между действительными источниками сигнала. При $\Delta\tau = 1{,}5 \div 2{,}0$ мс кажущийся источник будет перемещаться в сторону опережающего сигнала. Увеличение $\Delta\tau$ от 2 до 40 мс приводит к изменению тембра сигнала и к впечатлению о приходе запаздывающего сигнала с направления, отличного от направления прихода прямого, и, наконец, при $\Delta\tau = 40 \div 50$ мс сигналы явно расщепляются и воспринимаются как эхо.

4. В условиях кинопоказа несовпадение направления на действительный монофонический источник сигнала (или на кажущийся при стереофонической передаче) с направлением на соответствующий ему видимый на экране объект корректируется последним на величину до 0,25 от ширины экрана.

5. Субъективное определение расстояния до источника звука связано с оценкой изменения громкости и тембра сложного сигнала и осуществляется с размытостью по глубине.

Глава 5.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ НА КАЧЕСТВО ЗВУКОПЕРЕДАЧИ

Сигналы, создаваемые натуральными источниками звука, в процессе звукопередачи претерпевают ряд изменений. Эти изменения обусловлены несовершенством некоторых элементов системы передачи и могут заметно снизить качество передаваемых звучаний. Для устранения этого система передачи снабжена устройствами, позволяющими осуществлять коррекцию и в определенной мере восстанавливать объективные параметры сигналов. Корректирующие устройства могут быть использованы и в творческом плане для такого видоизменения исходного сигнала, которое сделало бы его звучание более ярким и выразительным. Однако для умелого использования этих устройств необходимо знать, насколько заметными для слуха будут те изменения объективных характеристик сигналов, которые вносятся как самой системой, так и корректирующими устройствами при обработке сигналов, осуществляемой звукорежиссером. Это в равной мере относится к передаче семантической и эстетической информации.

Таким образом, появляется необходимость в количественном определении степени заметности на слух тех изменений натуральных сигналов, которые вносятся передающей системой вследствие несовершенства ее электроакустических характеристик. К ним относятся: уровень передаваемых звучаний, динамический и частотный диапазоны, ширина и неравномерность частотной характеристики, нелинейные искажения, временные и пространственные искажения воспроизводимых звучаний.

5.1. Влияние изменений уровня громкости

Средний уровень громкости при передаче программ через электроакустическую систему не остается постоянным. При записи он изменяется звукорежиссером, а при воспроизведении киномехаником (в условиях кинопоказа) или слушателем (в условиях приема радио- и телепрограмм). Первый из них делает это, добиваясь соответствия звука видимому на экране изображению, вторые — исходя из условий прослушивания. Очевидно, уровни громкости при просмотре кинофильмов в условиях большого зала и по телевидению в малых помещениях будут сильно отличаться. Опыт показывает также, что при прослушивании одинаковых по характеру радио- и телепрограмм уровень громкости в последнем случае обычно ниже, так как созданию необходимой четкости и ясности в этом случае способствует артикуляция губ и движение самого исполни-

теля, видимого на экране. Кроме того, при монтаже фонограммы звукорежиссер вынужден менять уровень громкости для выравнивания отдельных частей звуковой программы, записанных в разное время и в различных условиях. Таким образом, по уровню громкости программы, передаваемые с помощью электроакустической системы, далеко не всегда отвечают уровню громкости оригинального сигнала.

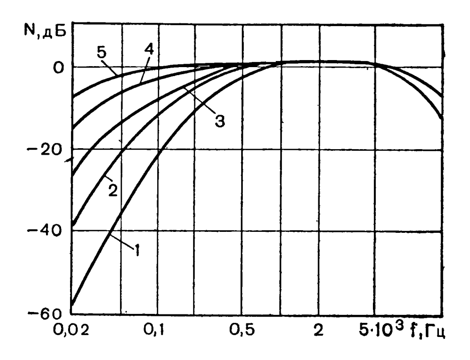


Рис. 5.1. Частотные характеристики чувствительности слуха при различных уровнях громкости

Если, пользуясь рис. 4.1, построить частотные характеристики чувствительности слуха при разных уровнях громкости, они будут выглядеть так, как показано на рис. 5.1. На нем *1*, *2*, *3*, *4* и *5* — кривые, соответствующие уровням громкости сигнала 30, 50, 70, 90 и 110 фон. Судя по рисунку, передача сложного сигнала с постепенно повышающейся громкостью равносильна переходу с одной из этих кривых на другую, более высокую, с большей подчеркнутостью низких частот. Понижение уровня передачи равносильно смещению на кривую со все большей потерей низких частот.

Повышение или понижение уровня передачи связано с первичным и вторичным помещениями, в которых проводится запись и прослушивание записанного сигнала. Если в помещениях соблюдены оптимальные акустические условия, то уровень громкости звучания благодаря интегрирующей способности слуха в отношении энергии первых отражений будет повышаться в каждом из них на 4÷8 дБ. Отклонение от оптимальных условий в ту или другую сторону будет приводить к соответствующему увеличению или уменьшению уровня громкости. Роль вторичного помещения в отношении изменения громкости зависит еще от его назначения. Если это кинотеатральный зал или зал с системой звукоусиления, в нем при помощи усилительного устройства можно создавать такой повышенный уровень громкости, который обеспечивал бы нормальное восприятие для всех, даже самых удаленных от источника слушателей. В случае приема радио- или телепрограмм в домашних условиях такой уровень громкости, каким он выбирался в указанных помещениях, будет недопустимо большим. Чтобы в малых помещениях обеспечить нормальные условия восприятия и не мешать живущим в соседних помещениях, уровень сигнала выбирается значительно более низким, чем это характерно для натурального звучания.

Таким образом, в массовых аудиториях уровень громкости воспроизводимого звучания может быть заметно выше, чем у сигнала натурального. В малых же помещениях этот уровень обычно много ниже. Такое изменение уровня громкости способствует улучшению

условий восприятия, однако требует, чтобы в процессе его регулировки использовалась частотная коррекция, соответствующая кривым на рис. 5.1.

5.2. Влияние ограничения динамического диапазона передачи

Динамический диапазон звукопередающей системы от источника сигнала до его приемника, по определению ОИРТ, представляется в виде разности трех величин, выраженных в децибелах. Уменьшаемым является уровень максимально допустимого звукового давления полезного сигнала $p_{макс}$, отнесенного к звуковому давлению, обусловленному шумами $p_{мин}$, а вычитаемыми — допуски $\Delta_{макс}$ и $\Delta_{пом}$ соответственно на перегрузку и на перекрытие помех. Таким образом:

$$D_{дБ} = 20\lg \frac{p_{макс}}{p_{мин}} - \Delta_{макс} - \Delta_{пом}. \quad (5.1)$$

Предельно возможный диапазон системы, очевидно, будет представляться равенством:

$$D_{дБ} = 20\lg \frac{p_{макс}}{p_{мин}} \text{ или } D_{дБ} = N_{пол} - N_{ш}, \quad (5.2)$$

где $N_{пол}$ и $N_{ш}$ — уровни максимального полезного сигнала и шума.

Как видно из равенства (5.2), нижней границей динамического диапазона является уровень шума, вносимого всеми звеньями системы звукопередачи, включая первичные и вторичные помещения. Шумы в радиовещательных и телевизионных студиях нормированы ОИРТ, и их уровни звуковых давлений не должны превышать значений, ограниченных соответственно кривыми *1* и *2*, приведенными на рис. 5.2. В условиях кинематографии считают, что ателье для записи музыки имеет уровень собственных шумов около 25 дБ (*3*), что близко к нормированным значениям; в павильонах синхронной съемки, учитывая шум киносъемочных камер, этот уровень повышается до 30÷35 дБ (*4*). Шумы вносятся также усилительными устройствами передающей системы и звуконосителем. Магнитные и особенно фотографические звуконосители увеличивают уровень шума на 4÷5 дБ. Если же учесть неоднократную перезапись фонограмм, в массовой фильмокопии этот уровень возрастает до 10÷12 дБ. Особенно велики шумы в помещениях прослушивания, достигая в залах театров и кинотеатров 30÷35 дБ, а в жилых помещениях 40÷45 дБ.

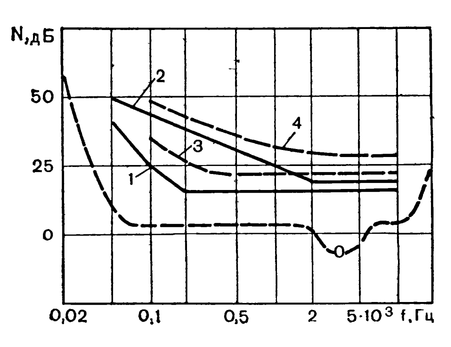


Рис. 5.2. Допустимые уровни шумов в радио- (*1*) и телестудиях (*2*), ателье озвучения (*3*) и павильоне синхронной съемки (*4*)

Таким образом, основными элементами, вызывающими шумы в системе передачи, являются помещения, в которых создается и принимается звуковая программа. Уровни этих шумов в условиях радиовещания и телевидения составляют 45÷50 дБ, а в условиях кинематографа — 35÷45 дБ.

Верхний предел динамического диапазона связан в основном с ограничением уровня звукопередачи при прослушивании. Чтобы не подходить близко к болевому порогу слухового восприятия, в массовых аудиториях диапазон выбирается не выше 100÷110 дБ, а в малых — в целях исключения их перегрузки — в пределах 70÷80 дБ. Хотя использование усилительных устройств для увеличения верхнего уровня передачи сигналов приводит одновременно к увеличению уровня шума, однако воспринимаемая громкость сигналов высокого уровня нарастает быстрее, чем сигналов малых (см. рис. 4.1), что несколько расширяет динамический диапазон.

В случае магнитной записи звука ограничителем сверху являются нелинейный участок характеристики намагничивания ленты, при фотографической записи — ширина фонограммы. При переходе в процессе записи за пределы названных границ наступает режим перемодуляции, характеризуемый искажениями формы кривой и появлением значительных нелинейных искажений. Если нелинейные искажения, оцениваемые коэффициентом $K = 2 \div 3\%$, считать допустимыми, то, пользуясь характеристиками конкретных пленок, можно определить предельные режимы записи звука. Эти режимы позволяют получить предельно возможный динамический диапазон для магнитных лент, равный 45 дБ, и для фотографических — 35÷40 дБ.

Подводя итоги, можно сделать несколько общих заключений.

1. Факторами, ограничивающими «снизу» динамический диапазон звукопередачи, являются шумы звуконосителя, первичного и вторичного помещений. Их уровень при передаче радиовещательных, телевизионных и кинопрограмм доходит до 40 ÷ 50 дБ.

2. Уровни шумов в первичных помещениях неодинаковы и лежат в пределах от 10 ÷ 15 до 30 ÷ 35 дБ. Во вторичных помещениях наибольшие шумы обычно возникают при прослушивании радио- или телепрограмм. Они в условиях городских жилых помещений могут быть на 5 ÷ 10 дБ выше, чем в залах кинотеатров.

3. Основную роль в ограничении динамического диапазона «сверху» играют те же звенья передающего тракта, которые ограничивали его «снизу», т. е. звуконосители и помещения.

4. Роль звуконосителей в ограничении максимальной величины сигнала связана или с нелинейностью кривой намагничивания (при магнитной записи), или с недостаточной шириной фонограммы (при фотографической записи). Такую же роль играют акустические условия первичного и вторичного помещений. В массовых аудиториях нормальные условия восприятия связываются с предельным уровнем сигнала 90÷100 дБ, а в жилых помещениях — 80 дБ.

5. Существующие системы звукопередачи в состоянии неискаженно передать динамический диапазон таких натуральных сигналов, как дикторская речь, звучание большинства музыкальных инстру-

ментов, эстрадного оркестра. Однако для ряда из них динамический диапазон системы оказывается недостаточно широким. Это прежде всего относится к звучанию органа, фортепиано, симфонического оркестра, хора и художественной речи.

5.3. Заметность ограничения частотного диапазона при передаче речи и пения

Очевидно, звукопередающая система, имеющая прямолинейную частотную характеристику, которая полностью перекрывает спектральные характеристики любых сигналов, не будет вносить в передачу частотных искажений. Вместе с тем, так как оценка качества звучания осуществляется слухом, при определении ширины частотного диапазона следует исходить из того, что частотные искажения могут возникать при его ограничении, однако они должны остаться для слуха совсем или почти совсем необнаруживаемыми. Следовательно, только субъективная оценка заметности частотных искажений позволяет определить, при каких ограничениях частотной характеристики системы качество передачи звучания данного источника будет отвечать поставленному требованию. Такая оценка должна охватывать все виды натуральных сигналов в различных режимах их действия при одиночном и групповом звучании.

Опыты по определению заметности ограничения частотного диапазона при речевых передачах проводились несколькими исследователями. Б. А. Адаменко проводил их при ограничении диапазона последовательно на семи частотах, сначала низких, а затем высоких. Границы диапазона смещались равномерно от значения 50 до 700 Гц — в первом случае и от 2000 до 12 000 Гц — во втором случае. Уровень громкости при воспроизведении составлял $80 \div 85$ дБ. Квалифицированные эксперты определяли качество звучания по пятибалльной системе путем прослушивания одного и того же сигнала, передаваемого без ограничения и с ограничением диапазона. Эти опыты были повторены нами при использовании в качестве экспертов студентов звукооператорской специализации. Результаты указанных экспертиз, проводимых по общей оценке качества звучания, показаны в виде графиков на рис. 5.3.

Как и следовало ожидать, женский голос (кривые *2* и *2'*), имеющий по сравнению с мужским (кривые *1* и *1'*) составляющие более высоких частот, оказался менее критичным к ограничению в низкочастотной области диапазона и более критичным к ограничениям в области высоких частот. Попарное рассмотрение кривых *1*, *1'* и *2*, *2'*, имея в виду, что кривые с номерами без индекса соответствуют дикторскому, а с индексом — художественному чтению, показывает, что вид программы также сказывается на заметности частотных ограничений. Так, для мужского голоса при художественной программе критичность на низких частотах меньше, а на высоких — больше, чем при дикторском чтении. Это может быть объяснено тем, что при исполнении художественной программы голос становится громче

и максимум энергии его (см. рис. 2.3) смещается в область более высоких частот.

Для женского голоса искажения становятся более заметными при сужении диапазона со стороны низких частот в случае чтения дикторского текста и при сужении его со стороны высоких — для художественного чтения. Это связано со спектральной характеристи-

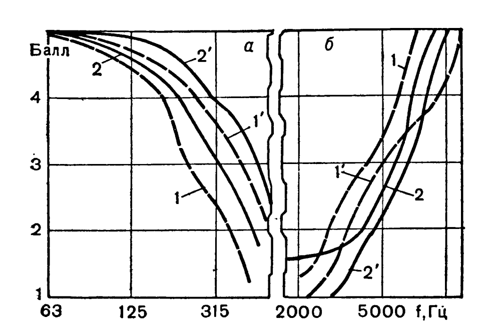


Рис. 5.3. Заметность ограничения диапазона со стороны низких (*а*) и высоких (*б*) частот для женской (*2*, *2'*) и мужской (*1*, *1'*) речи

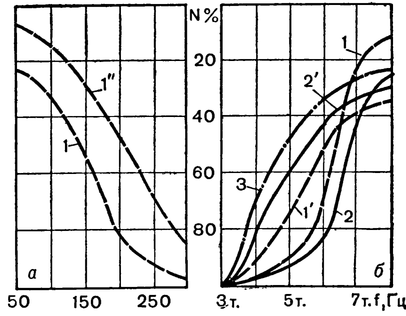


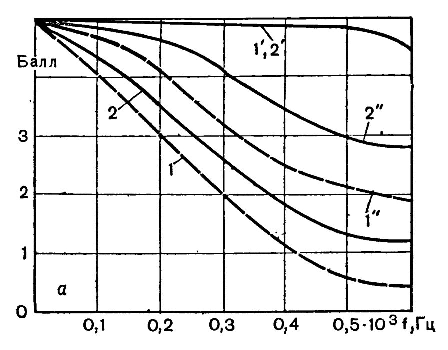
Рис. 5.4. Зависимость ограничения диапазона со стороны низких (*а*) и высоких (*б*) частот для женского и мужского голосов в режиме речи (*1*, *2*) и пения (*1'*, *1''*, *2'*)

кой указанного голоса (см. рис. 2.3), которая при дикторском исполнении по сравнению со случаем художественного чтения расширяется в область низких и высоких частот.

Таким образом, заметность ограничения частотного диапазона при звукопередаче зависит как от протяженности частотного спектра исходного сигнала, так и от распределения его энергии по частотным составляющим. Весомую поправку в эту зависимость вносит также падение чувствительности органа слуха к краям звукового диапазона.

Данные о влиянии ограничения частотного диапазона на качество звучания певческого голоса были получены в других опытах [11]. Они показаны на графике рис. 5.4, где кривые *1*, *1'* и *1''* построены для мужского голоса соответственно при речевом и вокальном исполнении (тенор и бас), кривые *2* и *2'* — для женского голоса в речевом и певческом режиме (колоратурное сопрано). По оси ординат отложено число экспертов (в процентах), замечающих искажения. Кривые этого рисунка подтверждают большую заметность ограничения частотного диапазона в области высоких частот для звучания женской речи. Из них видно, что ограничение диапазона с любой стороны и для каждого голоса слухом обнаруживается при вокальном исполнении меньше, чем при речевом. Еще меньшая критичность по отношению к ограничению диапазона, как показывает кривая *3* рис. 5.4, *б*, проявляется в случае хорового пения, что является следствием (как видно из рис. 2.2 и рис. 2.3) ухудшения передачи речевых формант, менее важных для восприятия пения.

Рис. 5.5 позволяет оценить влияние ограничения диапазона на качество семантической информации (кривые *1'*, *2'*), характеризуемой понятностью речи, и эстетической информации (1″, 2″), которая характеризуется только тембром (оценка на слух других ее составляющих затруднена). При рассмотрении этих кривых обнаруживается, что понятность мужской (*1'*) и женской (*2'*) речи и за-



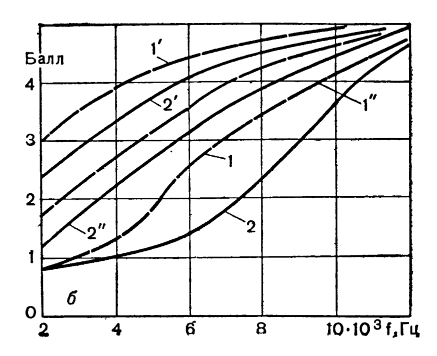


Рис. 5.5. Заметность органичения частотного диапазона для речи (*а*, *б*) общая (*1*, *2*), по понятности (*1'*, *2'*) и тембру (*1''*, *2''*)

метность изменения ее тембра не составляют в сумме общей заметности ограничения (кривые *1* и *2*). Это указывает на важность других неучтенных здесь характеристик речевого сигнала. Кроме того, видно, что ограничение диапазона влечет за собой все более заметное изменение тембра речи, тогда как понятность ее изменяется мало, особенно при ограничении диапазона в области низких частот.

На рис. 5.6 приведены данные о значимости отдельных полос частотного диапазона для передачи семантической (*1*) и эстетической (*2*) информации (понятности и тембра). Они были получены для женского голоса при поочередном включении одной из восьми частотных полос. На рисунке помещен также график (*3*) весового значения каждой полосы в создании общего уровня звукового давления (в децибелах). Обращает на себя внимание то, что каждый из трех рассматриваемых параметров имеет несовпадающие между собой максимумы и минимумы, из чего следует, что сокращение частотного диапазона по-разному сказывается на их передаче. Если в создании общей громкости участвуют почти все частотные полосы, то понятность речи определяется прежде всего полосами частот от 30 до 5000 Гц, а в сохранении тембральной окраски наибольшая ответственность ложится на полосы от 50 до 300 Гц и от 2000 до 10 000 Гц.

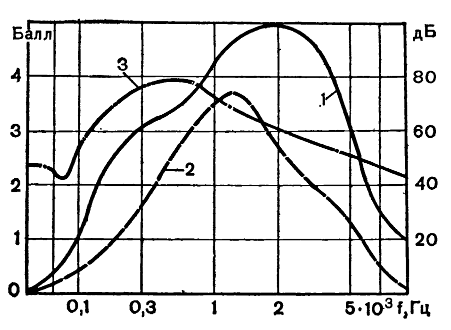


Рис. 5.6. Значимость частотных полос в передаче понятности (*1*), тембра (*2*) и уровня (*3*) речевого сигнала

В заключение можно сделать несколько общих выводов.

1. Ограничение диапазона со стороны низких частот более заметно при передаче мужской речи. Уверенная заметность (3 балла) для дикторского чтения наступает при граничной частоте 320 Гц, для художественного — при частоте 250 Гц.

2. Ограничение со стороны высоких частот заметнее для женской речи. Для нее оценка 3 балла в режимах дикторского и художественного чтения соответствует граничным частотам 6000 и 6500 Гц.

3. Заметность ограничения при передаче певческого голоса меньше, чем при передаче речи. Для хора она снижается еще больше.

4. Все большее сужение диапазона при речевых передачах приводит сначала к искажению тембра, а потом к снижению разборчивости.

5.4. Заметность ограничения частотного диапазона при передаче инструментальной музыки

Учитывая, что в музыкальной практике используется много инструментов и что среди них имеются сходные, опыты по заметности частотных ограничений проводились на типовых инструментах, входящих в низко-, средне- или высокочастотную группу. В первой из них были такие, как контрабас, труба, во второй — скрипка, кларнет и, наконец, в третьей — треугольник, коробочки и пр. Оценка качества звучания осуществлялась при прослушивании звукоряда каждого инструмента при соответствующем ограничении диапазона.

На рис. 5.7 слева приведены два пучка кривых соответственно для групп низко- и высокочастотных инструментов и ограничения диапазона со стороны низких частот. Справа даны такие же пучки кривых для случая ограничения диапазона в области высоких частот. Крайние кривые каждого из пучков показывают разброс границ для участков звукоряда. Так, заметность ограничения, оцениваемая

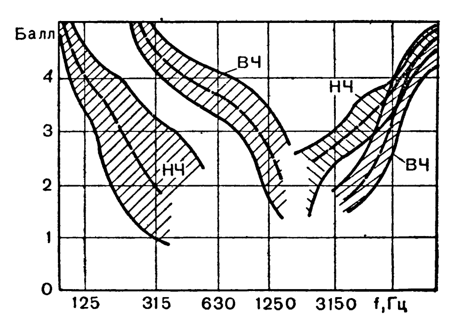


Рис. 5.7. Заметность ограничения частотного диапазона для низкочастотных (*НЧ*) и высокочастотных (*ВЧ*) инструментов

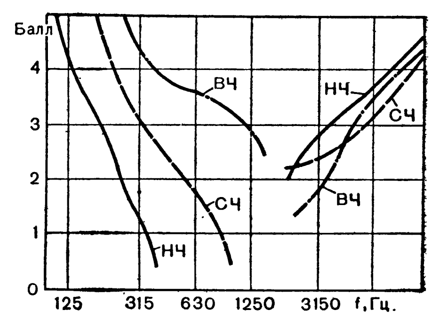


Рис. 5.8. Усредненные кривые заметности органичения частотного диапазона для групп *НЧ*, *СЧ* и *ВЧ* инструментов

тремя баллами, для низкочастотных инструментов имеет место при разбросе в пределах частот 150÷350 Гц в случае ограничения «снизу» и в пределах частот 3000÷5000 Гц — при ограничении «сверху».

Усредненные кривые заметности для различных групп инструментов показаны на рис. 5.8. На нем видно, что кривые ограничения на низких частотах идут достаточно полого. Отсюда следует, что

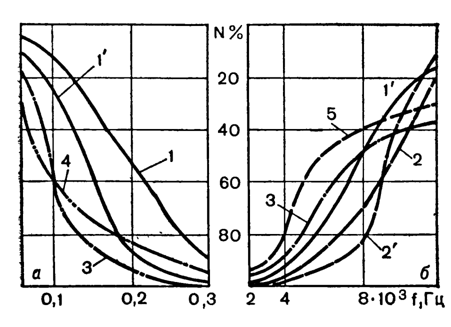


Рис. 5.9. Заметность ограничения частотного диапазона для симфонического (*1*, *1'*), духового (*2*, *2'*), эстрадного (*3*) оркестров, органа (*4*) и рояля (*5*)

Рис. 5.10. Взвешенное значение частотных полос для семантической (*1*) и эстетической (*2*) информации, передаваемой музыкой

для всех инструментов, особенно высокочастотных, заметность к все большему ограничению невелика. При ограничении на высоких частотах кривые располагаются теснее и круче, следовательно, заметность здесь для всех групп инструментов почти одинакова и увеличивается быстро.

Важно установить, как ограничение частотного диапазона влияет на качество звучания оркестров или ансамблей. Об этом можно судить по рис. 5.9, на котором собраны кривые заметности ограничения диапазона для симфонического (кривая *1* — с литаврами и кривая *1'* — без них), духового (кривая *2* — с ксилофоном и кривая *2'* — с колокольчиками) и эстрадного (кривая *3*) оркестров. Анализ кривых позволяет отметить, что ограничение полосы частот «снизу» (рис. 5.9, *а*) только в пределах частот 50÷150 Гц приводит к заметному снижению качества звучания; последующее же сужение мало ухудшает его качество. Это происходит потому, что кривые заметности для групп инструментов (см. рис. 5.8) в этой части диапазона широко расходятся и ограничение приводит к заметности только одной (низкочастотной) или в худшем случае двух (и среднечастотной) групп инструментов. Помимо этого, характер кривых даже для одного и того же типа оркестра может изменяться и в зависимости от полноты использования низко-и среднечастотных инструментов и от наличия в оркестре дополнительных инструментов (см. кривые *1* и *1'* на рис. 5.9). То же можно сказать и об ограничении в области высоких частот. Наличие в духовом оркестре такого высокочастотного инструмента, как колокольчики, вызвало крутое падение

кривой заметности *2′* по сравнению с кривой *2* в полосе 8000÷10 000 Гц (рис. 5.9, *б*).

Если по заметности ограничения диапазона сравнить оркестры различного типа, то оказывается, что к смещению вверх низкочастотной границы наиболее чувствителен эстрадный оркестр (*3*). Он же в отношении ограничения диапазона со стороны высоких частот показал наименьшую чувствительность по сравнению с симфоническим (*1′*) и тем более с духовым оркестром (*2, 2′*). Наибольшая крутизна кривых заметности искажений и, следовательно, наибольшая критичность к ним обнаруживаются при ограничении диапазона в границах до 5000÷9000 Гц, что закономерно, так как именно в этой зоне сосредоточены гармонические составляющие музыкальных сигналов (см. гл. 2) и их потеря почти одинаково неприятна (см. рис. 5.8) для любой из групп инструментов.

На рис. 5.9 кроме кривых заметности ограничения для оркестров приведены такие же кривые для органа (*4*) и рояля (*5*), часто выступающих вместе с оркестром.

Для музыкальных сигналов, еще больше, чем для речевых, важно определить потери семантической и эстетической информации при ограничении частотного диапазона. Под семантической информацией в данном случае понимается хорошая узнаваемость звучаний различных инструментов и их мелодий. С эстетической связывают правильность передачи тембральной окраски звучаний.

Опыты по оценке качества передачи семантической информации, которую несут различные группы инструментов при ограничении диапазона, показали, что она начинает снижаться при ограничении диапазона снизу частотами выше 500 Гц и сверху частотами ниже 5000 Гц. Отсюда следует, что семантическая информация при музыкальных передачах не может быть искажена, так как такие ограничения практически никогда не бывают. Что же касается влияния ограничений диапазона на передачу эстетической информации (тембра), то оказалось, что оно почти точно выражается кривыми рис. 5.9, характеризующими общую заметность ограничения диапазона. Следовательно, при оценке качества музыкальных звучаний, воспроизводимых системой, имеющей суженный частотный диапазон, слуховое восприятие ориентируется в основном на изменение тембра. Это подтверждается данными рис. 5.10, из которых видно, что главными для передачи семантической информации (кривая *1*) являются полосы *V, VI* (от 1000 до 6000 Гц), никогда не подвергающиеся ограничению. Вместе с тем для эстетической информации (кривая *2*) определяющими являются полосы *III, IV* и *VII*, лежащие по краям частотного диапазона, поэтому всякое ограничение частотной характеристики передающей системы прежде всего отражается на потере художественного качества музыкальных передач.

Ниже приводятся краткие выводы.

1. Заметность ограничения частотного диапазона «снизу» для различных инструментов очень неодинакова. Она наибольшая при звучании низкочастотных инструментов.

2. Ограничение со стороны высоких частот почти одинаково и более заметно влияет на качество звучания всех трех групп инструментов.

3. Качество звучания оркестра при ограничении диапазона определяется составом его инструментов и характером исполняемого музыкального произведения. Ограничение снизу более заметно при звучании эстрадного оркестра, а при ограничении сверху — при звучании духового оркестра.

4. Ограничение частотного диапазона при музыкальных передачах обнаруживается прежде всего в искажении тембра, т. е. приводит к снижению художественного качества звучания.

5.5. Влияние крутизны подъема и спада частотной характеристики на ее краях

Исследования заметности частотных искажений такого типа [11] проводились при разной высоте и крутизне спадов и подъемов, создаваемых на краях частотной характеристики раздельно или одновременно в сторону низких и высоких частот.

Оценка заметности искажений осуществлялась по проценту экспертов, обнаруживающих их в процессе эксперимента. На слух эти искажения воспринимались как искажения тембра, который в зависимости от того, ослабевали или усиливались при этом низко- или высокочастотные составляющие, становился все более глухим или более резким.

В результате эксперимента для случая крутого спада частотных характеристик (3÷10 дБ на октаву) в сторону низких и высоких частот были получены кривые, представленные на рис. 5.11. Кривые *1, 2, 3* и *4* соответствуют граничным частотам спада 30, 50, 100 и 200 Гц, а кривые *1′, 2′, 3′, 4′* и *5′* — граничным частотам спада 15 000, 10 000, 7300, 6000 и 4000 Гц. Как показывает этот рисунок, при крайних частотах 30 и 15 000 Гц (кривые *1* и *1′*) заметность искажений очень мала и почти не зависит от крутизны спада. Только при приближении крайних частот диапазона к средней части характеристик заметность спада начинает постепенно возрастать, достигая 65% при его крутизне 10 дБ на октаву и значениях граничных частот 200 и 4000 Гц. Очевидно, возрастающая заметность спада обусловлена увеличивающимся значением в передаче тех частотных полос, которые отсекаются и деформируются на участках спада.

Если частотная характеристика имеет подъем подобного же типа, заметность искажений увеличивается (рис. 5.12, *а* и *б*). При тех же граничных частотах (кривые *4* и *5′*) и предельной крутизне 10 дБ на октаву заметность характеризуется уже величиной 85—95%. Это увеличение при подъеме характеристики у высокочастотного (рис. 5.12, *б*) больше, чем у низкочастотного конца диапазона. Кроме того, при малых подъемах (3÷5 дБ) заметность искажений, особенно для высокочастотной зоны, изменяется слабо, тогда как последующее их увеличение влечет за собой быстрый рост заметности.

Из сравнения кривых на рис. 5.11 и 5.12, имеющих одинаковые граничные частоты (номера), следует, что подчеркивание низких и особенно высоких частот при звукопередаче лучше замечается слухом, чем их ослабление.

При более плавных односторонних спадах частотной характеристики с крутизной 3÷10 дБ на 3÷4 октавы (рис. 5.13) обнаружива-

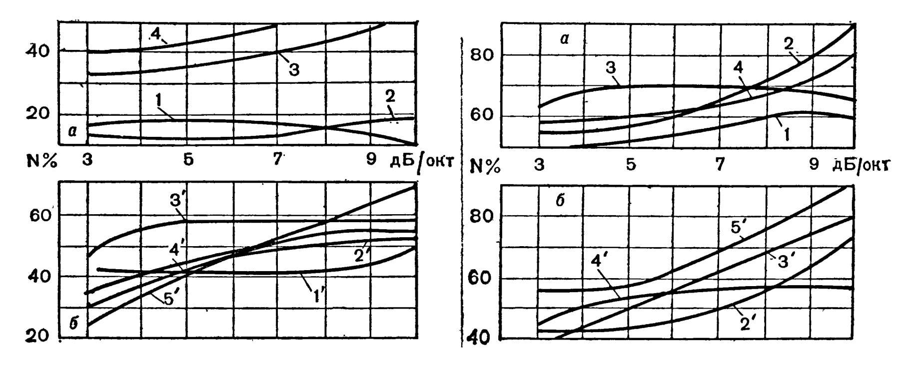


Рис. 5.11. Заметность крутого спада частотной характеристики (в децибелах, на октаву) в области низких (*а*) и высоких (*б*) частот

Рис. 5.12. Заметность крутого подъема частотной характеристики в области низких (*а*) и высоких (*б*) частот

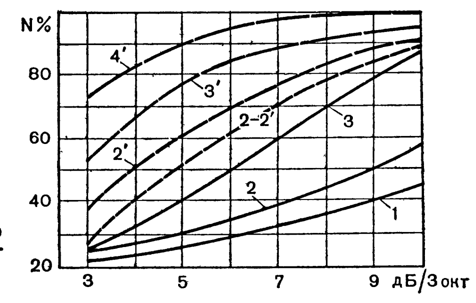


Рис. 5.13. Заметность двустороннего (*2—2′*) и одностороннего спада к граничным частотам 30, 50, 100 Гц (*1, 2, 3*) и 10 000, 6000, 4000 Гц (*2′, 3′, 4′*)

ется та же тенденция увеличения заметности искажений по мере смещения границы спада к области средних частот и при переходе от спада в зоне низких частот к спаду в зоне высоких частот. Помимо этого, сравнение кривых на рис. 5.11 и рис. 5.13 приводит к заключению, что заметность искажений в этом случае значительно больше, чем при резком спаде характеристики. Такое увеличение заметности искажений при более пологих спадах характеристики объясняется все бо́льшим уменьшением амплитуд среднечастотных составляющих звукового сигнала, в отношении которых чувствительность слуха наиболее высока.

Опыты по оценке заметности искажений, вызываемых двусторонним спадом в сторону низких и высоких частот, привели, в частности, к зависимости, показанной на рис. 5.13 кривой *2 — 2′*, которая отвечает крайним частотам спада 50 и 10 000 Гц. При сравнении

кривых $2-2'$ и $2'$ обнаруживается, что двусторонний спад характеристики предпочитаем одностороннему, относящемуся только к крайней высокой частоте 10 000 Гц. Это объясняется тем, что слух лучше замечает разбалансировку низко- и высокочастотных составляющих сигнала, чем одновременную их потерю. Следовательно, сочетание подъема и спада на разных концах характеристики еще более нежелательно, так как в этом случае нарушение баланса увеличится.

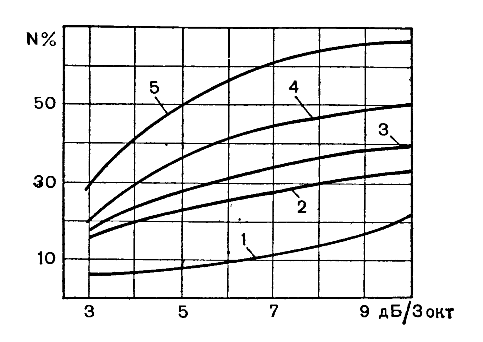


Рис. 5.14. Заметность спада к частоте 30 Гц для звучаний оркестра (*1*), мужского певческого голоса (*2*) и речи (*3*), органа (*4*) и рояля (*5*)

Заметность частотных искажений зависит также от вида сигнала, передаваемого системой. Как показывают кривые рис. 5.14, заметность постоянного спада характеристики для звучаний различных источников неодинакова. Наибольшее влияние такого спада обнаруживается на звучаниях рояля и органа, у которых интенсивности низкочастотных составляющих сигнала относительно велики.

Приведенный анализ позволяет сделать несколько общих выводов.

1. При крутом спаде краевых участков характеристики частотные искажения невелики, особенно если спад не превышает 3÷5 дБ на октаву или относится к низкочастотной части диапазона.

2. Пологий спад более заметен особенно у высокочастотного края, когда он обнаруживается 80÷100% экспертами.

3. Заметность подъема у высокочастотного края диапазона больше, чем для одинакового по величине спада или для низкочастотного края.

4. При двустороннем спаде или подъеме характеристики наиболее желательна симметричная ее форма, когда низко- и высокочастотные составляющие сигнала максимально сбалансированы.

5. Заметность искажений при спаде или подъеме характеристики к низким или высоким частотам зависит от того, какие частотные составляющие будут преобладать в конкретном звуковом сигнале.

5.6. Заметность искажений, обусловленных пиками и провалами на частотной характеристике звукопередачи

Субъективный метод оценки качества звучания позволяет экспериментально определить заметность неравномерности частотной характеристики не только на краях, но и внутри диапазона.

Речевые сигналы. Результаты такого эксперимента для речевого сигнала (женский голос) показаны в виде сглаженных кривых *1* —

4 на рис. 5.15. Кривые *1* и *2* получены при пиках характеристики высотой соответственно 4 и 10 дБ, а кривые *1'* и *2'* — при провалах ее на те же величины. Каждая из кривых первой пары располагается ниже соответствующей ей кривой второй пары, из чего следует, что пики на характеристике вызывают более заметные искажения, чем провалы. Вероятно, это происходит потому, что пики на характеристике воспринимаются слухом как некоторые искусственные форманты, влияющие не только на тембр, но и на фонематическую четкость речевого сигнала. По кривым также видно, что большие пики или провалы (кривые *2*, *2'*) приводят к большей заметности искажений. Эти выводы повторяют выводы, сделанные при рассмотрении влияния краевых участков частотной характеристики, следовательно, они являются общими для любого ее участка.

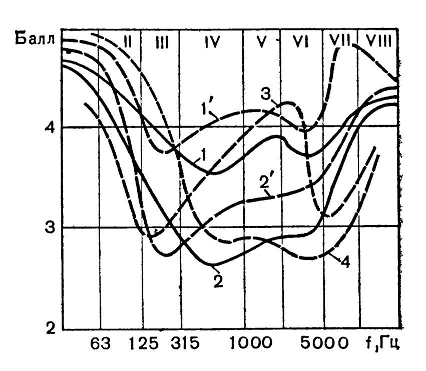


Рис. 5.15. Кривые заметности пиков на 4 и 10 дБ (*1*, *2*) и провалов (*1'*, *2'*) на частотной характеристике при передаче речи и пения (*3*, *4*)

Из кривых на рис. 5.15 следует и то, что наибольшая заметность искажений, обусловленных пиками на характеристике, относится к четвертой (315÷1000 Гц), а наибольшая заметность появления провалов — к третьей частотной полосе (125÷315 Гц). Однако такой сдвиг заметности не является характерным для всех голосов и их режимов. Если сравнить кривые *3* и *4*, полученные для женского и мужского голосов в режиме пения при пиках на характеристике равных 10 дБ с соответствующей кривой (*2*) для речи, то окажется, что при пении наиболее критичными для женского голоса становятся полосы *III* и *VI*, а для мужского — *IV* и VII. Возвращаясь к рассмотрению частотных спектров мужского и женского голосов (см. рис. 2.3), можно установить, что *III* и *IV* полосы относятся к области, где интенсивность частотных составляющих голоса наиболее велика, а *VI* и *VII* полосы связаны с передачей высокочастотных составляющих, очень важных для сохранения тембра голоса. Таким образом, вывод о связи заметности искажений со спектральным составом сигнала становится также общим для любого вида неравномерности в пределах всей частотной характеристики.

Музыкальные сигналы. Рассматривая результаты опытов с музыкальными инструментами, необходимые обобщения можно сделать по материалам, полученным для наиболее характерных из них. Такими инструментами могут быть, например, контрабас, тромбон и колокольчики, относящиеся к группам струнных, духовых и ударных и одновременно представляющие собой инструменты низко-, средне- и высокочастотного типа.

На рис. 5.16 изображены кривые заметности искажений, обусловленных пиками и провалами на различных участках частотной характеристики. На нем кривые *2* и *3* первой группы все больше смещены относительно кривой *1* в область высоких частот. Это означает, что наибольшая заметность пиков для контрабаса связа-

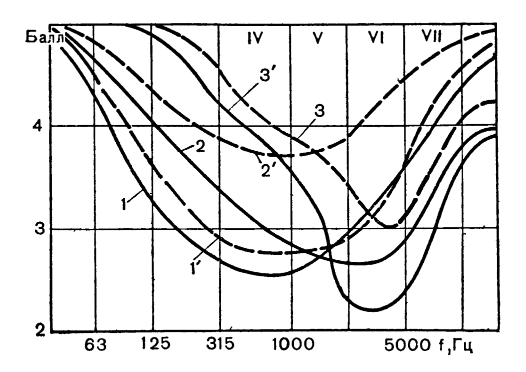


Рис. 5.16. Кривые заметности пиков и провалов на характеристике при звучании контрабаса (*1*, *1′*), тромбона (*2*, *2′*), колокольчиков (*3*, *3′*)

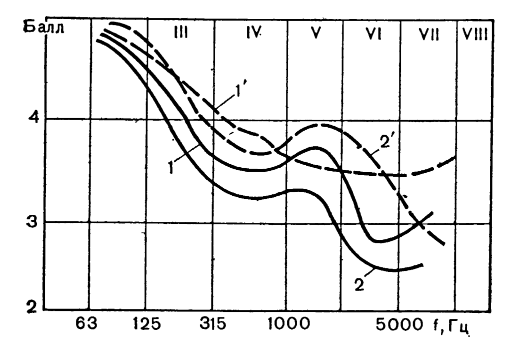


Рис. 5.17. Заметность пиков и провалов на характеристике при звучании симфонического (*1*, *1′*) и эстрадного (*2*, *2′*) оркестров

на с низкочастотной частью характеристики, тогда как для инструментов более высокого строя, очень заметными становятся искажения при смещении пиков в область высоких частот. Та же закономерность, хотя и менее ярко, обнаруживается для второй группы кривых.

Можно заметить, что кривые *1*, *2*, *3* располагаются ниже и шире, чем соответствующие им кривые *1′*, *2′*, *3′*. Это указывает на меньшую заметность провалов характеристики по сравнению с ее пиками.

Кривые *1*, *1′* и *2*, *2′*, приведенные на рис. 5.17, показывают те же закономерности для симфонического и эстрадного оркестров. Большая критичность в отношении искажений, обнаруживаемая для эстрадного оркестра, очевидно, связана с наличием в нем большего

числа высокочастотных инструментов (литавры, треугольники и пр.). Таким образом, кривые на рис. 5.16 и 5.17 доказывают, что выводы, сделанные для речевых сигналов, распространяются и на сигналы музыкального типа.

Практический интерес представляет весовое распределение музыкальных сигналов с наибольшей заметностью искажений в заданных полосах частот (рис. 5.18). Судя по рисунку, наибольшее снижение качества передач происходит при пиках на характеристике в полосах *III—VI*, а при провалах — в полосах *V—VII*. Наименее же опасными будут две полосы с левого и одна с правого края частотного диапазона.

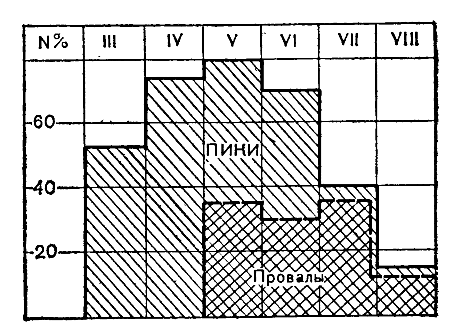


Рис. 5.18. Весовое значение заметности искажений в пределах частотных полос *I—VIII* при пиках и провалах на характеристике

В заключение следует привести ряд обобщающих положений.

1. Пики и провалы на частотной характеристике передачи тем больше заметны на слух, чем больше они по уровню и ширине. Заметность искажений при пиках больше, чем при провалах.

2. Наибольшая заметность относится к полосам, в которых выше чувствительность слуха и больше по амплитуде составляющие сигналов.

3. При ширине пиков и провалов менее трети октавы искажения, вызванные ими, почти не обнаруживаются на слух. При ширине в одну октаву допустимой неравномерностью характеристики на краях можно считать 4÷5 дБ, а в середине диапазона — не более 2÷3 дБ.

5.7. Заметность нелинейных искажений

Субъективная оценка нелинейных искажений часто не совпадает с объективной. Оказывается, что их заметность на слух зависит не только от величины коэффициента гармоник, но и от особенностей слуха, спектрального состава передаваемого сигнала и вида самих гармоник.

Исследование заметности нелинейных искажений, обусловленных появлением второй и третьей гармоник (квадратичных и кубичных искажений), привели к результатам, выраженным графически соответственно на рис. 5.19 и 5.20. На каждом из них кривые *1, 2* и *3* последовательно отвечают случаям прослушивания симфонического, духового и эстрадного оркестров, а кривые *4* и *5* — прослушиванию мужского голоса в режиме пения и информационного сообщения.

Рассматривая первый рисунок, можно установить, что увеличение квадратичных искажений приводит к заметному снижению ка-

чества звучания. Уже при коэффициенте гармоник, равном 5—10%, они хорошо обнаруживаются на слух. Наиболее заметны они при передаче инструментальной музыки и менее заметны — для вокального исполнения и особенно для дикторской речи. В случае кубических искажений (см. рис. 5.20) кривые располагаются почти в той же последовательности, но ниже и спад их круче. Это означа-

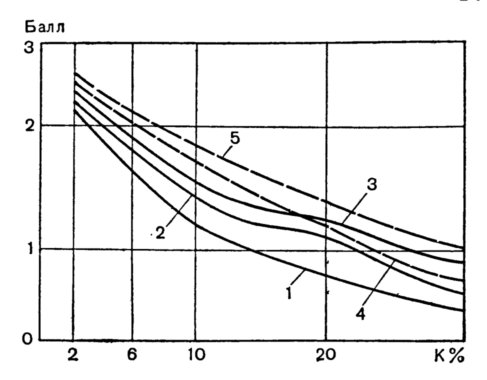


Рис. 5.19. Кривые заметности квадратичных искажений при звучании оркестров (*1, 2, 3*) и голоса (*4, 5*)

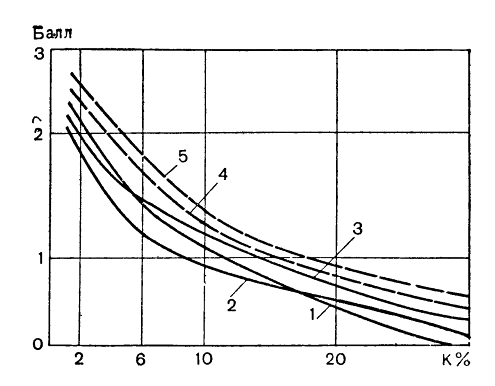


Рис. 5.20. Кривые заметности кубичных искажений

ет, что наибольшая заметность и в случае кубических искажений сохраняется при восприятии звучаний сложных музыкальных источников. Вместе с тем большая крутизна делает кубические искажения более опасными. Их заметность возрастает в 1,5÷2 раза. Такое увеличение заметности нелинейных искажений может быть объяснено тем, что в случае квадратичных искажений возникающие гармоники смещены по отношению к основному тону на целое число октав, в случае же кубичных искажений эти смещения относительно друг друга будут равны не октаве, а дуадециме. В последнем случае консонанс будет менее совершенным и искажения более заметными на слух.

Искажения типа «центральная отсечка», могущие возникнуть в процессе радиопередач, представляются в виде выпадения центральной части кривой звукового колебания. Результаты экспертного прослушивания оркестровых (симфонического и эстрадного) и речевого сигналов при внесении искажений этого типа показывают, что в этом случае происходит еще большее снижение качества звучания и оценка быстро падает, становясь «недопустимо заметной» уже при объективной величине искажений порядка 4÷6%. В отличие от предыдущих видов при искажениях вида «центральная отсечка» наиболее критичным оказался речевой сигнал.

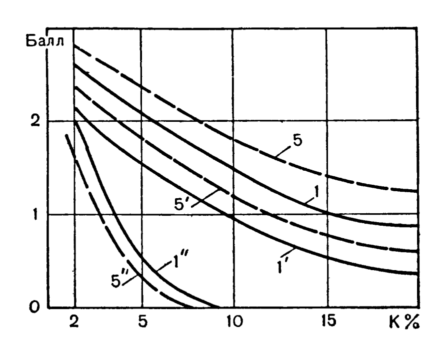


Рис. 5.21. Заметность искажений: квадратичных (*1*, *5*), кубичных (*1'*, *5'*) и типа «центральная отсечка» (*1''*, *5''*) для музыкальных (*1*, *1'*, *1''*) и речевых (*5*, *5'*, *5''*) звучаний

Если свести вместе, как это сделано на рис. 5.21, наиболее отличающиеся по заметности кривые для искажений различного типа (*1* и *5*, *1'* и *5'*, *1''* и *5''*), то по ним можно обнаружить, что при коэффициенте гармоник порядка 5% квадратичные искажения находятся на границе «заметно», кубичные искажения — «уверенно заметно», а искажения вида «центральная отсечка» (*1''*, *5''*) приближаются к недопустимо большой заметности.

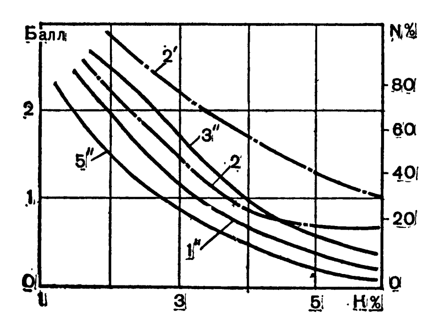


Рис. 5.22. Заметность нелинейных искажений типа «центральная отсечка» для звучания симфонического (*1''*), эстрадного (*3''*) оркестров и речи (*5''*) при передаче их звучаний с помощью тракта с $f_в = 10\,000$ Гц и для первого из них при $f_в = 14\,000$ Гц и 4000 Гц (кривые *2* и *2'*)

Искажения последнего типа, являясь симметричными, приносят в спектр основного сигнала только нечетные гармоники, а они, как и в случае кубичных искажений, для слуха более заметны. При этом заметность «центральной отсечки» возрастает вместе с увеличением числа гармоник, что хорошо подтверждается кривыми *2* и *2'*, приведенными на рис. 5.22. Они показывают заметность по относительному числу экспертов в процентах (шкала дана справа от графика) при искажениях вида «центральная отсечка» для случаев, когда искаженный сигнал воспроизводился с помощью систем, имеющих широкий (до 14 000 Гц) и узкий (до 4000 Гц) частотный

диапазон. Как видно из этих кривых, сокращение частотного диапазона передачи приводит к уходу за его пределы все большей части продуктов нелинейности и к повышению оценок. То же, правда, в несколько меньшей мере, наблюдается и при восприятии нелинейных искажений других видов.

Следует отметить, что искажения типа «центральная отсечка» в отличие от других обнаруживаются на слух не по изменению тембра сигнала, а по все усиливающимся хрипам и треску.

Ниже приведены выводы, основанные на анализе заметности нелинейных искажений, которые могут возникнуть в трактах звукопередачи.

1. Субъективная оценка нелинейных искажений не совпадает с объективной, определяемой по коэффициенту гармоник.

2. Заметность этих искажений на слух зависит от их вида. Слух чувствителен меньше к четным гармоникам (квадратичные искажения) и больше к нечетным гармоникам (кубичные искажения).

3. Чувствительность слуха к нелинейным искажениям возрастает по мере увеличения числа гармоник, появляющихся в сигнале, что подтверждается на примере искажений типа «центральная отсечка».

4. Если квадратичные искажения считать допустимыми при значении коэффициента гармоник равном $5 \div 6\%$, то для кубичных искажений эта величина должна быть снижена до $2 \div 3\%$, а для искажений вида «центральная отсечка» — до $1 \div 2\%$.

5. Характер передаваемого сигнала влияет на заметность названных искажений. Наименьшая заметность квадратичных и кубичных искажений характерна для голоса (речь, пение), наибольшая заметность — для оркестровых программ. При искажениях типа «центральная отсечка» наибольшая заметность установлена для речевых передач.

6. Заметность нелинейных искажений всех типов увеличивается вместе с расширением частотного диапазона звукопередачи.

Глава 6.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ И УСЛОВИЙ ЕЕ РАБОТЫ

6.1. Общая характеристика звукопередающих систем

Из материалов предыдущих глав следует, что звуковая система в процессе передачи не должна вносить заметных искажений в частотный состав, в интенсивностные, временные и пространственные характеристики исходных сигналов. Вместе с тем она должна обеспечивать возможность такого управления характеристиками, в результате которого в воспроизводимом звучании оптимально сочетались бы технические и художественные показатели. Необходимость передавать ряд сигналов и одновременно осуществлять управление ими требует, чтобы на входной стороне профессиональных звуковых систем было достаточно большое число приемных каналов. Управление сигналами, передаваемыми по этим каналам, может выполняться как путем подбора микрофонов и условий их работы, так и путем регулировок, осуществляемых управляющими устройствами. Таким образом, обработка исходных сигналов может быть *предварительной* (начальной), предусматривающей оптимальный выбор и размещение микрофонов относительно источников звука, стен помещения и друг друга, и *последующей*, осуществляемой с помощью управляющих устройств в процессе первичной записи сигналов.

Если программа передачи несложная, то сигналы после такой двухступенчатой обработки подаются на аппарат записи или передачи. В случае сложных передач, когда двухступенчатая обработка затруднена, например при передаче оркестровой музыки, сигналы, поступающие на каждый из каналов, записывают отдельно и подвергают дополнительной обработке в процессе перезаписи. Системы с двух- и трехступенчатой обработкой могут быть монофоническими и стереофоническими. В первой из них разделение сигналов имеет место только на этапах управления, тогда как во второй — на всех этапах передачи, включая и звуковоспроизведение.

Монофоническая система способна передать ту часть информации о сигнале, которая связана с его частотным спектром, интенсивностью и временными параметрами. Стереофоническая система благодаря полному разделению каналов имеет возможность передавать информацию, относящуюся также к пространственному расположению источников звука и к акустической обстановке первичного помещения. Эта дополнительная информация, повышая качество передаваемого звучания и усиливая эмоциональное воздействие передачи на слушателей, одновременно требует специального решения вопроса об управлении сигналами.

Различие в параметрах и в способах управления указывает на необходимость раздельного анализа их применительно к каждой из систем.

6.2. Требования, предъявляемые к монофоническим системам передачи

В начальный период развития звукотехники считалось, что звуковые системы в идеале должны обеспечивать такую передачу, при которой выходные сигналы были бы в точности подобны исходным. Поэтому усилия специалистов сосредоточивались на разработке методов устранения различных искажений. Когда же эти методы были найдены, оказалось, что с их помощью каждый из входных сигналов может быть свободно трансформирован по одному или сразу по нескольким своим параметрам. Появилась возможность создания большого композиционного разнообразия для передаваемых звучаний в поиске такого из вариантов, при котором обеспечивалась бы наивысшая эмоциональность восприятия. Процесс звукопередачи стал процессом творческим.

Очевидно, что наиболее полное использование возможностей системы связано не только с ее высокими техническими показателями, но и с тем, в какой мере они могут быть изменены при решении конкретных творческих задач и каковы удобства выполнения таких операций. Следовательно, полный перечень этих показателей должен содержать в себе требования к самой системе, к элементам управления и к эксплуатационным данным, обеспечивающим удобство работы с системой.

Общие технические требования к системам звукопередачи по четырем классам качества нашли отражение в ГОСТ 11551—65. Для профессиональных систем высшего и I классов эти требования представляются следующим образом (в скобках даны параметры систем I класса):

рабочий диапазон частот — 30÷15 000 (50÷10 000) Гц;

неравномерность частотной характеристики на краях в пределах от $f_н$ до 1,5 $f_н$ и от 0,66 $f_в$ до $f_в$ — 6 (6) дБ;

неравномерность в средней части характеристики — 2 (2) дБ;

коэффициент гармоник при частоте испытательного сигнала до 100 Гц — 1÷2 (3÷6) %, от 100 до 200 Гц — 0,7÷1,5 (1,7÷3,5) %, от 200 до 4000 Гц — 0,6÷1 (1,2÷2,5) % и выше 4000 Гц — 1÷2 (2,5÷5) %.

Как видно из перечня требований, величины вошедших в него параметров выбирались исходя из особенностей источников и приемников звука. Так, неравномерность частотной характеристики выбиралась с учетом того, что меньшая заметность относится к краям, а бо́льшая — к середине частотного диапазона.

В ГОСТ приведены также нормы для предельно допустимых величин коэффициента гармоник, которые хорошо согласуются с выводами, сделанными в результате анализа заметности нелинейных искажений. Принято во внимание и то, что при измерениях на повы-

шенных частотах коэффициент гармоник может увеличиваться из-за смещения гармоник больших номеров за пределы передаваемого диапазона, и то, что он зависит от особенности восприятия вновь возникающих гармоник (четных и нечетных).

Требования к управлению системой звукопередачи пока твердо не установлены, и их можно сформулировать только в самом общем виде. Они должны исходить из того, какие параметры сигнала и на сколько нужно трансформировать, чтобы в ходе передачи можно было бы создать любую звуковую ситуацию художественного плана из числа встречающихся в практике работы опытных режиссеров. Пределы изменения этих параметров могут быть дополнительно расширены в целях создания новых, еще не использованных ситуаций, представляющих художественную ценность.

Анализ особенностей художественной передачи звучаний (глава 3) показывает, что для монофонических систем в числе управляемых параметров должны быть такие, как уровень передаваемых сигналов, ширина частотного диапазона, высота пиков и провалов частотной характеристики на ее краях и в середине, акустическое отношение и время реверберации. Кроме того, интересные результаты дает изменение временных параметров сигнала.

Небезынтересно отметить, что к настоящему времени уже определился достаточно большой перечень элементов звукопередающей системы, которые выполняют функции управления сигналами и позволяют осуществлять разнообразную их обработку. Так, пользуясь поканальными регуляторами уровней, можно устанавливать звуковой баланс различных музыкальных звучаний или в соответствии с художественной задачей выделять звучания отдельных источников звука или их групп. Управление общим уровнем сигнала и использование ограничителей уровня позволяют управлять динамикой звучаний, исключать нелинейные искажения, появляющиеся в результате возможного выхода за пределы прямолинейного участка амплитудной характеристики системы. Смещение вверх нижней границы частотного диапазона часто улучшает передачу речи, а ограничение его в нижней и верхней части позволяет создавать новые звуковые эффекты (например, эффект телефонного разговора), устранять мешающие призвуки некоторых музыкальных инструментов и помехи системы.

Различные по величине пики и провалы в середине частотной характеристики системы могут быть использованы для коррекции частотных характеристик микрофонов, для подчеркивания, подавления или изменения характерных оттенков отдельных звучаний, что может улучшить передачу или придать ей необычность и новизну.

Пики на участках средних частот позволяют усилить формантные области музыкальных инструментов и голоса, сделать звучание более рельефным, ярким, увеличить носкость голоса, придать звучанию те особенности, которые принято связывать с эффектом присутствия. Подъем в области высоких частот создает эффект приближения источника и повышает разборчивость.

Общие характеристики звукопередающих систем позволяют сформулировать следующие требования к предварительной обработке сигналов:

1. Электроакустические характеристики микрофонов, отбираемых для звукопередач, должны максимально соответствовать характеристикам сигналов и помещений, из которых ведется передача.

2. Количество одновременно используемых микрофонов и каналов должно определяться из необходимости правильной передачи всех элементов сложного звучания.

3. Распределение микрофонов по группам и их размещение относительно источников звука и друг друга должны быть такими, чтобы обеспечить создание музыкального и речевого баланса или оправданного нарушения его в отношении какого-то из источников.

4. Расстояние между каждым из микрофонов и соответствующим источником или их группой должно выбираться из условий воссоздания нужной звуковой перспективы.

К специальным элементам управления нужно предъявить особые требования. Эти элементы должны:

1. Обеспечивать регулировку уровней сигналов в каналах и на выходе системы для получения звукового баланса и динамики звучания, которые соответствовали бы реальному сигналу или его творчески переработанной модели.

2. Осуществлять ограничение частотного диапазона для устранения помех и призвуков, для создания новых звуковых эффектов.

3. Позволять проведение коррекции частотной характеристики в любой ее зоне и в пределах, необходимых для повышения качества звучания.

4. Допускать введение таких изменений сигнала, которые связаны с улучшением его временных и пространственных характеристик.

Основные эксплуатационные требования:

1) аппаратура должна быстро приводиться в рабочее состояние и обеспечивать стабильные результаты работы всех ее элементов;

2) она должна быть простой в управлении и обеспечивать максимальные удобства выполнения различных регулировок;

3) она должна быть устойчивой к изменениям атмосферного давления, температуры, влажности воздуха и силы ветра;

4) ее переносные элементы (микрофоны, пульты и др.) должны иметь возможно малые размеры и массу, малую чувствительность к сотрясениям и ударам;

5) устройства управления должны быть независимыми, и при их работе не должны возникать шумы, шорохи и пр.

6.3. Определение числа каналов, используемых при монофонических передачах

Важная особенность звукопередач в условиях радиовещания, телевидения и кинематографа — участие в них часто большего количества различных источников звука, отличающихся по своим ха-

рактеристикам, рассредоточению и постоянству положения в пределах некоторого пространства. Источники звука действуют или одновременно, что более характерно для музыкальных передач, или поочередно, как это чаще бывает при речевых передачах. Необходимость полного охвата этих источников, создания должного баланса и звуковой перспективы, связанных с правильной передачей звуковой картины или с ее трансформацией, требует предоставления звукорежиссеру широких возможностей для поиска оптимальных композиционных решений. Для этого прежде всего необходимо иметь большое число управляемых каналов, каждый из которых передавал бы сигналы от отдельных источников или их групп. Отсюда следует, что для наиболее сложных передач, когда необходимые регулировки не могут быть выполнены во время исполнения данной программы, нужно пользоваться методом многоканальной записи сигналов с необходимой их обработкой в процессе перезаписи.

При меньшей сложности программы, когда необходимое управление сигналами можно осуществить в процессе первичной записи, от многоканальной записи можно отказаться. В этом случае главенствующее значение приобретает метод последующей обработки сигналов.

Упростить условия работы звукорежиссера можно путем объединения в группы микрофонов, принимающих сигналы от идентичных источников звука с подключением их к меньшему числу каналов. При уменьшении числа каналов следует учитывать, что некоторые музыкальные инструменты (ксилофон, колокольчики и др.) вообще не требуют специальной балансировки, а в ряде случаев необходимый баланс может быть обеспечен путем перемещения исполнителей или их инструментов. Следует помнить и то, что в процессе исполнения дирижер и музыканты сами создают внутренний баланс в оркестре. Для речевых передач упрощение условий их проведения еще более оправдывается. В них, как правило, участвует ограниченное число исполнителей, которые в процессе передачи часто остаются неподвижными.

Таким образом, появляется возможность разумного ограничения количества каналов и работающих на них микрофонов. Правда, в этом случае требуется более тщательная подготовка системы к работе, так как по мере уменьшения числа каналов роль последующей обработки сигналов падает, а предварительной — возрастает.

Среди передач могут быть такие сложные и даже простые, осуществление которых оказывается возможным только с помощью нескольких микрофонов, работающих на один приемный канал. Однако ряд опытных звукорежиссеров [2, 24, 38] рекомендует пользоваться всего одним микрофоном даже при передаче сложных звучаний больших оркестров. Эти рекомендации основываются на том, что для слушателей является привычным восприятие звучаний объемных источников звука при нахождении их в одной достаточно удаленной точке зала и что в зале, где звучит оркестр, почти всегда имеется зона, в которой благодаря внутреннему балансу оптимальным образом сочетаются параметры звучания.

Последнее утверждение хорошо иллюстрируется рис. 6.1, на котором штриховкой показана зона оптимального размещения микрофона, а стрелки показывают направления, в которых подчеркивается верхний (*А*) или нижний (*Е*) регистр струнных и звучание духовых инструментов (*Д*) или усиливается теплота (*Б*), четкость звука (*В*) и звуковая перспектива (*Г*). Следовательно, перемещая микрофон в пределах оптимальной зоны, режиссер может в соответствии с художественной необходимостью проводить нужные регулировки. Однако это справедливо при определенном размещении исполнителей в оптимальных акустических условиях в тонателье. Если же эти условия не выполняются, рекомендуется использовать минимальное число дополнительных микрофонов для достижения звукового баланса усилением отдельных инструментальных групп и акустического баланса изменением соотношения прямой и отраженной энергии.

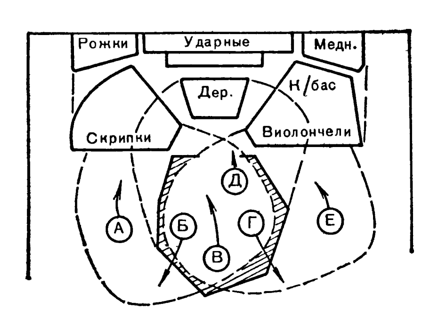


Рис. 6.1. Зона оптимального размещения микрофона перед оркестром и направления его смещения для подчеркивания ряда параметров звучания

Таким образом, выбор числа входных каналов передачи связывается с тем, какому из методов смешивания сигналов — искусственному или естественному — следует отдать предпочтение с учетом создания и оптимальных условий передачи и наибольшего удобства управления ею.

В настоящее время все больше звукорежиссеров склоняются к тому, что для передачи классической музыки, а также драматических и других речевых программ лучше использовать один входной канал системы с включением в него одного или нескольких микрофонов. Использование двух, трех каналов считается оправданным в том случае, когда нужно выделить вокалиста на фоне инструментальной музыки, установить баланс между звучаниями хора и оркестра или соединить звучания, записанные в разное время. Несколько каналов используют и в случае, если недостатки студии не позволяют добиться нужного смешения сигналов или оно затруднено из-за ограниченного времени проведения репетиции и записи.

Использование большого числа входных каналов правомерно при поиске новых художественных решений, создании фантастических, сказочных или новых звучаний, характерных для современной популярной музыки. Своеобразие последней заключается в том, что общее звучание ансамбля создается голосами и инструментами в ближнем поле микрофонов. Это требует большого числа каналов и часто двух микрофонов на каждого исполнителя (для голоса и инструмента). Электронная музыка и появившаяся на Западе «конкретная» музыка, представляющая собой смешение природных, бытовых и производственных звуков, также не могут быть переданы

без обработки этих звуков в ряде управляемых каналов. Есть звукорежиссеры [34], считающие правильным использование системы с большим числом каналов и для передач классических музыкальных произведений в исполнении симфонического и духового оркестров.

Подводя итоги, нужно отметить следующее:

1. Для проведения монофонической передачи у звукорежиссера имеется много возможностей. Он может использовать систему с большим числом входных каналов и трехступенчатым управлением сигналами; с необходимым числом каналов, сигналы которых сводятся для одноканальной записи, с двухступенчатым управлением; с одним каналом, работающим на несколько или даже на один микрофон, с преимущественным использованием предварительной обработки сигналов.

2. Выбор числа каналов зависит не столько от числа источников звука, сколько от нарушений баланса, звуковой перспективы, прозрачности и др., обнаруживаемых при их передаче, а также от необходимости трансформировать эти параметры в нужном направлении.

3. Один входной канал выбирается обычно при передаче сигналов простых или сложных источников, которые полностью обеспечивают естественное равновесие основных качественных параметров (звуковой баланс, прозрачность, четкость звучания и др.).

4. Для дополнительной балансировки названных параметров в зависимости от удобства применения предварительной и последующей обработки сигналов может быть увеличено число каналов или число микрофонов в одном канале.

5. В системах с большим числом каналов для удобства смешивания сигналов и управления ими должно быть предусмотрено объединение каналов в группы с общими групповыми устройствами управления.

6. Монофоническую систему с предварительной многоканальной записью можно рекомендовать для передачи звучаний, которые или не могут быть повторены, или их повторение, необходимое для отработки программы регулировок, является очень дорогостоящим.

6.4. Условия применения группы микрофонов

Монофоническая передача предполагает включение в систему ряда одновременно работающих микрофонов. При таком включении возникает важный вопрос о разделимости сигналов. Идеальным с точки зрения управления сигналами было бы такое положение, при котором каждый микрофон принимал бы сигнал только от одного источника из создающих сложное звучание. Однако в реальных условиях это трудно выполнимо, и практически каждый микрофон, участвующий, например в передаче звучания оркестра, воспринимает сигнал не только от ближайшего к нему инструмента, но и от соседних. В этом случае регулировка одного сигнала будет связана с регулировкой других сигналов. Кроме этого, такое воздействие одного источника на несколько соседних микрофонов приводит к появлению дополнительных искажений.

Если считать, что сигнал от источника звука воспринимается не только основным микрофоном, но и соседним, более от него удаленным, то сигналы, развиваемые ими на выходе, представятся в виде:

$$u_1 = A_1 \sin \omega t;$$

$$u_2 = A_2 \sin \omega \left(t + \frac{\Delta d}{c_0}\right),$$

где $\Delta d = d_2 - d_1$ — разница пути, проходимого звуковой волной от источника до каждого микрофона, и c_0 — скорость звука.

Так как сигналы, поступающие от микрофонов, подвергаются на выходе звукорежиссерского пульта электрическому сложению, то суммарный сигнал будет представляться в виде:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \omega \left(t + \frac{\Delta d}{c_0}\right) \qquad (6.1)$$

или, заменяя второе слагаемое по формуле синуса суммы двух углов, в виде:

$$u_\Sigma = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \omega t \cos \frac{\omega \Delta d}{c_0} + A_2 \cos \omega t \sin \frac{\omega \Delta d}{c_0} =$$

$$= \left(A_1 + A_2 \cos \frac{\omega \Delta d}{c_0}\right) \sin \omega t + A_2 \sin \frac{\omega \Delta d}{c_0} \cos \omega t. \qquad (6.2)$$

Обозначив множители перед $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ таким образом:

$$\left.\begin{aligned} A_1 + A_2 \cos \frac{\omega \Delta d}{c_0} &= A_\Sigma \cos \varphi; \\ A_2 \sin \frac{\omega \Delta d}{c_0} &= A_\Sigma \sin \varphi, \end{aligned}\right\} \qquad (6.3)$$

равенство (6.2) можно переписать в виде:

$$u_\Sigma = A_\Sigma \cos \varphi \sin \omega t + A_\Sigma \sin \varphi \cos \omega t = A_\Sigma \sin (\omega t + \varphi). \qquad (6.4)$$

Отсюда следует, что суммарный сигнал, имея ту же синусообразную форму, что и исходный, будет отличаться от него фазой φ и амплитудой A_Σ, которую можно найти из равенств (6.3). Сначала, возводя каждое из них в квадрат, можно получить выражения:

$$A_1^2 + 2A_1A_2 \cos \frac{\omega \Delta d}{c_0} + A_2^2 \cos^2 \frac{\omega \Delta d}{c_0} = A_\Sigma^2 \cos^2 \varphi;$$

$$A_2^2 \sin^2 \frac{\omega \Delta d}{c_0} = A_\Sigma^2 \sin^2 \varphi,$$

а потом, после их суммирования и извлечения корня, получить окончательное выражение для амплитуды суммарного сигнала:

$$A_\Sigma = \sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2 \cos \frac{\omega \Delta d}{c_0} + A_2^2}\,. \qquad (6.5)$$

Если подставить значение A_Σ из равенства (6.5) в равенство (6.4), то окончательное выражение для суммарного сигнала будет таким:

$$u_\Sigma = \sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2\cos\frac{\omega\Delta d}{c_0} + A_2^2}\cdot\sin(\omega t + \varphi). \qquad (6.6)$$

Из выражения (6.6) следует, что сигнал от одного источника, принятый двумя микрофонами, подключенными к монофонической системе, сохраняя свою форму, будет иметь амплитуду, зависящую не только от амплитуд A_1 и A_2, но и от частоты ω исходного сигнала и от размещения микрофонов относительно источника звука (Δd).

Анализируя выражение (6.6), можно допустить, что $A_1 = A_2 = A$. В этом случае амплитуда

$$A_\Sigma = \sqrt{2A^2\left(1 + \cos\frac{\omega\Delta d}{c_0}\right)} \qquad (6.7)$$

будет при $\frac{\omega\Delta d}{c_0} = 2n\pi$ принимать значение $A_\Sigma = 2A$, а при $\frac{\omega\Delta d}{c_0} = (2n-1)\frac{\pi}{2}$ значение $A_\Sigma = \sqrt{2}\,A$, наконец, при $\frac{\omega\Delta d}{c_0} = (2n-1)\pi$, $A_\Sigma = 0$. Амплитуда суммарного сигнала для этого случая будет изменяться в соответствии с кривой *1* на рис. 6.2, *а*.

Если считать, что $A_1 \neq A_2$, то при указанных значениях $\frac{\omega\Delta d}{c_0}$ амплитуды суммарного сигнала будут выражаться равенствами:

$$A_\Sigma = \sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2 + A_2^2} = A_1 + A_2, \quad A_\Sigma = \sqrt{A_1^2 + A_2^2};$$

$$A_\Sigma = \sqrt{A_1^2 - 2A_1A_2 + A_2^2} = A_1 - A_2.$$

Изменение амплитуды сигнала на выходе пульта для этого случая будет меньше, чем для предыдущего (кривая *2* на рис. 6.2, *а*). Из этого следует, что для уменьшения непостоянства амплитуды суммарного сигнала нужно разницу между амплитудами A_1 и A_2 делать больше, увеличивая отношение $\frac{d_2}{d_1}$ (см. рис. 6.2, *б*). Если это отношение не изменять, т. е. не менять положение микрофонов относительно источника звука, а изменять частоту сигнала ω, расчеты по формуле (6.7) приведут к получению частотной характеристики суммарного сигнала, которая по виду будет подобна кривым на рис. 6.2, *а*.

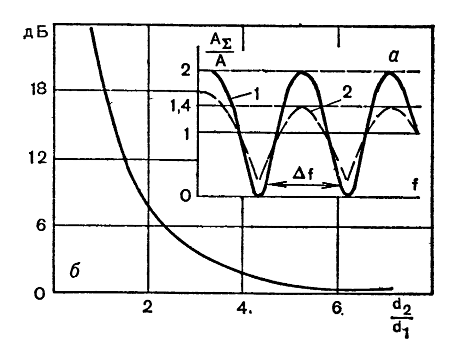


Рис. 6.2. Связь частотных искажений с относительным расстоянием $\frac{d_2}{d_1}$ до микрофонов (*б*) и частотная характеристика сигнала (*а*)

Выше отмечалось, что заметность частотных искажений зависит от интервала между соседними пиками частотной характеристики. По рис. 6.2, *б* видно, что этот интервал Δf может быть найден из равенства:

$$2\pi = \frac{\omega \Delta d}{c_0} = \frac{2\pi f \Delta d}{c_0} \text{ в виде } \Delta f = \frac{c_0}{\Delta d}. \quad (6.8)$$

Опыты показали (см. параграф 5.5), что частотные искажения, обусловленные пиковыми выбросами частотной характеристики, становятся заметными на слух уже при значениях Δf, близких к октаве. Последнее равенство показывает, что такой интервал в области средних и низких частот может иметь место, когда Δd изменяется в пределах от 0,5 до 3÷4 м. Причем, когда Δd мало, эти интервалы в начале диапазона могут занимать полосу в 3÷4 октавы, быстро сужающуюся с повышением частоты. Только при Δd порядка 3÷4 м частотный интервал даже в области низких частот становится меньше октавы.

Таким образом, применение при монофонической звукопередаче нескольких микрофонов приводит к изменению передаваемого сигнала.

1. Его амплитуда изменяется в зависимости от частоты, т. е. появляются частотные искажения.

2. Величина этих искажений тем меньше, чем больше сигналы, принимаемые микрофонами, различаются между собой по амплитуде. Увеличивая это различие так, чтобы получить соотношение $\frac{d_2}{d_1} > 3$, можно снизить искажения до допустимого значения 3÷4 дБ (см. рис. 6.2, *а*).

3. Увеличение разницы в расстояниях Δd приводит к сужению интервала Δf между пиками на частотной характеристике. Если выбирать $\Delta d \geqslant 3$ м, то интервал Δf становится меньше октавы, когда искажения такого типа становятся мало заметными на слух.

Итак, чтобы частотные искажения при использовании в системе группы микрофонов не выходили за пределы допустимых, необходимо расстояние между источником и каждым из соседних микрофонов выбирать из условий $\frac{d_2}{d_1} \geqslant 3$ и $\Delta d = d_2 - d_1 \geqslant 3$ м.

6.5. Сравнительная оценка микрофонов, применяемых для звукопередач

Ассортимент микрофонов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, достаточно велик. Число тех из них, которые отвечают требованиям высшего и I класса качества, составляет десятки названий. Однако стремление еще улучшить их технические и эксплуатационные свойства, получить возможность изменять акустические характеристики в соответствии с условиями работы, приводит к тому, что перечень новых типов микрофонов продолжает расти. Дальнейшее их совершенствование идет не только

в направлении повышения качественных параметров, но и по линии поиска средств управления этими параметрами. Часто такое совершенствование заканчивается разработкой комплекта микрофонов, отличающихся параметрами и снабженных устройствами для работы в различных условиях (например, КМКЭ9).

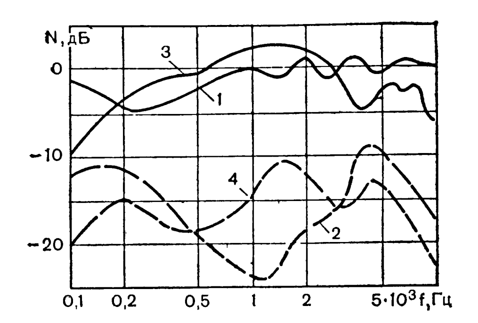


Рис. 6.3. Частотные характеристики по «фронту» (*1*, *3*) и «тылу» (*2*, *4*) микрофонов динамического МД-52А (*1*, *2*) и ленточного МЛ-18 (*3*, *4*) типов

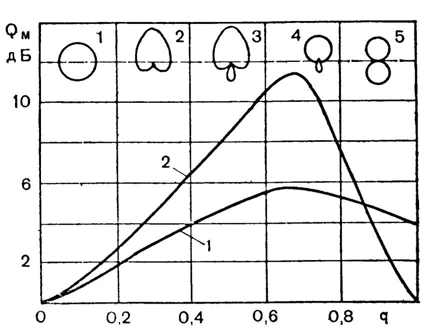


Рис. 6.4. Кривые индекса направленности (*1*) и перепада чувствительности «фронт» — «тыл» (*2*) для комбинированных микрофонов и их характеристики: *1* — круговая; *2* — кардиоидная; *3* — суперкардиоидная; *4* — гиперкардиоидная; *5* — косинусоидальная

Катушечные микрофоны. Электродинамические катушечные микрофоны в состоянии передать сигналы в достаточно широком диапазоне частот (50÷15 000 Гц). Однако расширение диапазона за пределы 300÷8000 Гц связано с дополнительной механо-акустической коррекцией, требующей высокой тщательности изготовления микрофонов. Даже в этом случае неравномерность их частотной характеристики не ниже 8÷10 дБ. Их преимуществом является большая механическая прочность и способность работать как в помещениях, так и вне их.

Катушечный микрофон — приемник давления (например, МД-59), будучи ненаправленным, не пригоден для работы в условиях повышенного шума. В этих условиях лучшие результаты достигаются при применении катушечных микрофонов комбинированного приема (например, МД-300-1, МД-82), которые имеют такой же частотный диапазон, при характеристике направленности в форме кардиоиды с перепадом чувствительности «фронт» — «тыл» в 10÷15 дБ (кривые *1* и *2* на рис. 6.3).

Дальнейшее обострение характеристики направленности достигается соединением в микрофоне двух катушечных капсюлей кардиоидного типа. Такой бикардиоидный микрофон (например, МДО-1) имеет перепад чувствительности «фронт» — «тыл» до 15÷18 дБ, но неравномерность его частотной характеристики в диапазоне частот 150÷8000 Гц растет до 12 дБ.

Соединяя вместе два акустически комбинированных приемника, можно получить микрофон с изменяющейся направленностью. Сло-

жение напряжений от этих приемников в фазе и противофазе дает кроме кардиоидной еще круговую или косинусоидальную характеристику направленности, а изменение соотношения напряжений — еще ряд (до восьми) характеристик такого вида, например как это показано в верхней части рис. 6.4.

Такая возможность управления характеристикой направленности реализуется, например, у микрофонов Д-330 и МД-69, причем делается это дистанционно. Указанные микрофоны позволяют также дистанционно управлять частотной характеристикой в области низких частот, снижая чувствительность на частоте 50 Гц до 12 дБ.

Нужно иметь в виду, что при изменении характеристики направленности микрофона происходит изменение так называемого *индекса направленности*, который выражается равенством:

$$Q_{\text{м}} = 10\lg\Omega = N_{\text{ос}} - N_{\text{диф}}, \qquad (6.9)$$

где $N_{\text{ос}}$ и $N_{\text{диф}}$ — соответственно уровни осевой и диффузной чувствительности микрофона.

Этот индекс показывает, на сколько в результате обострения характеристики направленности снижается уровень шума, принимаемого микрофоном, по отношению к сигналу, приходящему по направлению его оси. Так как для ненаправленного микрофона $N_{\text{ос}} = N_{\text{диф}}$, то для него $Q_{\text{м}} = 0$ и снижения шума не будет. Это видно также из рис. 6.4, на котором кривая *1* показывает изменение $Q_{\text{м}}$ в зависимости от соотношения:

$$q = \frac{E_{\text{ос}\cdot\text{гр}}}{E_{\text{ос}\cdot\text{к}}}, \qquad (6.10)$$

где $E_{\text{ос.гр}}$ и $E_{\text{ос.к}}$ — осевые чувствительности градиентного элемента и всего комбинированного микрофона.

Из этой кривой следует также, что если характеристика имеет вид кардиоиды ($q=0{,}5$), суперкардиоиды ($q=0{,}63$) или гиперкардиоиды ($q=0{,}75$), то индекс $Q_{\text{м}}$, или, что то же, снижение диффузного шума, воспринимаемого микрофоном, будет соответственно составлять 4,8; 5,2 и 6 дБ. По кривой *2* этого же рисунка можно найти перепады чувствительности от фронта к тылу для любого вида характеристики направленности.

Рассматривая основные параметры катушечных микрофонов, можно заметить, что эти микрофоны по рабочему диапазону частот отвечают требованиям к высшему и I классу качества. Вместе с тем далеко не все приближаются к ним в отношении неравномерности частотной характеристики. Из микрофонов этого типа заслуживают особого внимания те, у которых имеется система управления направленностью и частотной характеристикой (МД-69, МД-84, Д-45), и остронаправленные (МД-77, МД-81А), для которых $Q_{\text{м}} \geqslant 7$ дБ.

Ленточные микрофоны. Микрофоны ленточного типа, являясь в принципе приемниками градиента давления, имеют косинусоидальную характеристику направленности. Однако они могут иметь и другие характеристики направленности. Это достигается путем ком-

бинации приемника градиента давления (ленточного микрофона) и приемника давления (катушечного микрофона) или путем превращения части ленточного микрофона в приемник давления, что осуществляется при помощи специального механо-акустического устройства (МЛ-19). В результате такие комбинированные микрофоны могут приобрести характеристики направленности любого из названных типов. Частотная характеристика такого микрофона по фронту и тылу показана на рис. 6.3 (кривые *3* и *4*).

Ленточные микрофоны, в отличие от катушечных, имеют более высокую неравномерность частотной характеристики (10 дБ) и несколько суженный частотный диапазон. Они отличаются еще и тем, что у них, как у приемников градиента давления, появляются искажения ближней зоны. Ленточные микрофоны заметно превосходят катушечные по размерам и по массе. Они требуют осторожного обращения, так как их подвижная система (ленточка) недостаточно прочна.

Конденсаторные микрофоны. Все более широкое применение этих микрофонов в системах передачи объясняется их преимуществами по сравнению с микрофонами других типов. Эти преимущества заключаются в более широкой (30÷16 000 Гц) и равномерной (5÷6 дБ) частотной характеристике, в большей чувствительности, в малых размерах и массе.

Вследствие высокой чувствительности эти микрофоны можно размещать дальше от источника звука. Наличие же у некоторых из них (МК-18, КСМ-19, U-89i) регулирующих устройств позволяет устранять перегрузки, управлять направленностью и частотной характеристикой. Наряду с преимуществами конденсаторным микрофонам свойственны и некоторые недостатки. Так, уровень их собственных шумов на 10÷15 дБ выше, чем у катушечных микрофонов. Правда, они имеют наибольшую силу в области низких частот, где чувствительность слуха заметно снижается. Другой недостаток этих микрофонов — их подверженность влиянию влажности, приводящая к снижению чувствительности и повышению уровня шума. Это заставляет с осторожностью применять указанные микрофоны на открытом воздухе.

В связи с малыми размерами капсюлей этого типа они широко используются для создания остронаправленных и миниатюрных (петличных) микрофонов. Для последних особенно удобны микрофоны электретного типа (КМКЭ7), которые имеют широкий частотный диапазон (30÷20 000 Гц) и удовлетворительную неравномерность характеристики (8÷12 дБ). Успехи в совершенствовании микрофонов этого вида приводят к все большему их применению в системах высококачественной звукопередачи (МКЭ-11 и др.).

Конденсаторные (иногда катушечные) микрофоны используются также в системах, которые называются *радиомикрофонами.* Они удобны в работе, так как не ограничивают движения исполнителя.

Сравнение современных микрофонов различного типа (см. Приложение 2) показывает, что многие из них имеют близкие по величине акустические параметры, позволяющие использовать их в вы-

сококачественных системах звукопередачи. Это придает большую важность отличительным особенностям микрофонов.

1. Катушечные и особенно ленточные микрофоны по сравнению с конденсаторными имеют повышенную неравномерность частотной характеристики, меньшую чувствительность, бо́льшие размеры и массу.

2. Ленточные и в меньшей мере конденсаторные микрофоны подвержены воздействию атмосферных условий. Последние из них, и особенно электретные, имеют повышенный уровень шумов.

3. Для конденсаторного микрофона с переменной характеристикой направленности размеры и масса увеличиваются меньше, чем для таких же микрофонов другого типа.

4. Микрофоны-приемники градиента давления создают искажения ближнего поля, связанные с подчеркиванием низких частот при размещении их на малом ($0,3 \div 0,5$ м) расстоянии от исполнителя (см. Приложение 1).

5. Преимуществом некоторых образцов микрофонов является возможность использования их в качестве радиомикрофонов, а также наличие у них устройств для управления чувствительностью и частотной характеристикой.

6.6. Выбор микрофонов для речевых передач

Принимая во внимание указанные выше особенности, звукорежиссер может выбрать для работы такие виды микрофонов, которые наилучшим образом отвечают его художественному замыслу, условиям звукопередачи, характеру источника звука и типу сигнала.

При речевом типе сигнала нужно помнить, что передачи могут быть либо литературно-драматическими, либо информационными и что различие между ними не только чисто художественного плана.

В *литературно-драматических передачах* может участвовать один или несколько исполнителей. Когда передача речевых сигналов выполняется синхронно с изображением, исполнители располагаются на значительной площади и перемещаются в ее пределах в соответствии с характером передаваемого эпизода. Эти передачи ведутся из специальных ателье, имеющих малое время реверберации и достаточно высокий уровень собственных шумов, которые создаются работающей аппаратурой и обслуживающим персоналом. Условия передачи изображения требуют, чтобы микрофоны не попадали в кадр, что связано с удалением микрофона от исполнителей или с маскировкой его в пределах кадра. Нужно считаться и с возможностью разноплановой передачи одного и того же эпизода, когда смена масштаба изображения требует изменения в соотношении прямой и отраженной энергии, принимаемой микрофоном.

Если передается речь *информационного типа*, то при выборе соответствующего микрофона нужно помнить, что такая речь имеет более широкий частотный диапазон (см. гл. 2) и ее передача может осуществляться как в специальных, так и в случайных помещениях

или на открытом воздухе. Положение микрофона относительно исполнителя может быть оптимальным, так как, даже когда говорящий находится в кадре (репортаж), наличие микрофона в нем является вполне естественным.

Условия передачи речевых сигналов по радиоканалам отличаются от рассмотренных только в том, что относится к мерам по устранению случаев попадания микрофона в пределы зрительного кадра.

Таким образом, при литературно-драматических речевых передачах: а) источников звука может быть несколько, и они могут перемещаться относительно друг друга и декораций; б) помещения, в которых производится запись звука, сильно загрушены, т. е. они имеют малое время реверберации; в) запись звука или его передача осуществляется одновременно со съемкой или передачей изображения; г) на съемочной площадке располагаются аппаратура и обслуживающий персонал, создающие дополнительные шумы; д) один игровой эпизод может быть связан с показом разномасштабных изображений, требующих различных звуковых решений.

При записи или передаче речи информационного характера (дикторская речь, репортаж): а) микрофон должен обеспечивать передачу широкого частотного диапазона; б) размещение его относительно исполнителей (одного, двух) может быть оптимальным; в) акустические условия, в которых он работает, — непостоянны. Время реверберации может быть равным нулю (открытый воздух), оптимальным (речевые ателье) и очень большим (помещения вокзала, цеха); г) уровень шумов может изменяться в широких пределах от очень малых (дикторское чтение) до очень больших (репортажи в случайных помещениях и на натуре).

Осуществляя выбор микрофонов для передачи речевых сигналов, следует выяснить, насколько эти сигналы критичны к различным видам искажения.

На рис. 6.5 помещены усредненные кривые заметности одностороннего ограничения частотного диапазона для речи и музыки. Более низкое размещение кривых заметности для речевых сигналов указывает на большую критичность их в отношении ограничения диапазона со стороны как низких (кривая *1*), так и высоких (кривая *1'*) частот. Следовательно, частотный диапазон для одинаковой по качеству передачи речевых и музыкальных сигналов в первом случае должен быть шире. Этот вывод может быть сделан и по данным для двустороннего ограничения, приведенным на рис. 6.6. На нем непрерывными линиями показаны кривые, отвечающие речевым, прерывистыми — музыкальным сигналам. По оси абсцисс отложены значения нижней границы частотного диапазона, а верхняя граничная частота служит параметром кривых. Разумеется, что, так же как и ограничение частотной характеристики со стороны низких и высоких частот, пологие спады ее в этих областях будут более заметными для речевых передач, чем для музыкальных. Эта закономерность распространяется и на частотные искажения, вызываемые пиками и провалами частотной характеристики в средней ее части, о чем можно судить по рис. 5.15 и 5.17, из которых обнару-

живается, что кривые для речевого сигнала, как и на рис. 6.5 и 6.6, опускаются ниже, чем для сигналов музыкальных.

Таким образом, для речевых передач следует выбирать микрофон с более широкими и равномерными частотными характеристиками. Это особенно важно для передач информационного типа (см. параграф 2.2).

Так как в синхронных съемках фильма и литературно-драматических передачах участвует несколько перемещающихся исполнителей, то для их проведения необходимо иметь один микрофон с широкой характеристикой направленности, «охватывающей» всех исполнителей, или несколько микрофонов с такими же или с более обостренными характеристиками направленности и работающих на отдельных исполнителей или их небольшие группы. Учитывая высокий уровень шума, в помещениях, в которых ведется передача, желательно применять микрофоны с широкой характеристикой направленности со стороны «фронта» и с минимальной чувствительностью со стороны «тыла». Этому пожеланию отвечают однонаправленные микрофоны, для которых угол приема равен 120÷150°, а снижение шума составляет примерно 5 дБ. Если синхронная запись или передача ведется в помещениях, имеющих большое время реверберации, полезными могут быть остронаправленные микрофоны, которые, предотвращая попадание в кадр, можно удалять от исполнителя на значительные расстояния. Если же в таких передачах применять микрофоны с широкой характеристикой направленности (например, кардиоидные), то для уменьшения доли принимаемой микрофоном отраженной энергии следует уменьшать указанное расстояние, маскируя микрофон в пределах кадра. Нужно предупредить, что, несмотря на возможные изменения масштаба изображения в процессе съемки одного эпизода, производить изменение соотношения прямой и отраженной энергии, принятой микрофонами путем изменения расстояния или направленных свойств, не реко-

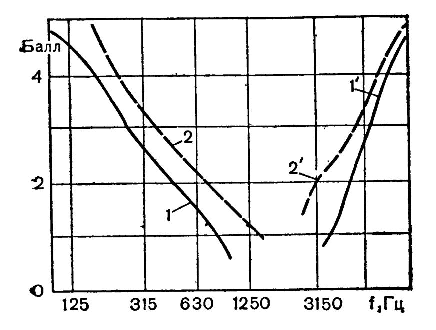


Рис. 6.5. Заметность одностороннего ограничения частотного диапазона для речевых (*1*, *1′*) и музыкальных (*2*, *2′*) сигналов

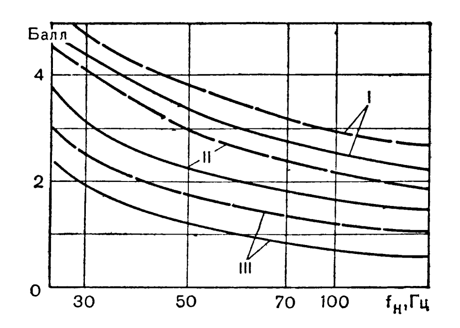


Рис. 6.6. Заметность двустороннего ограничения диапазона при разных нижней ($f_н$) и верхней ($f_в$) его границах для речи и музыки. Кривые *I*, *II*, *III* отвечают $f_в$ равной 8,6, 2 кГц

мендуется, так как это неприятно воспринимается слушателями. Следует выбрать усредненное соотношение энергий для всех принятых масштабов съемки.

Применение остронаправленных микрофонов оправданно и при информационных речевых передачах, особенно когда они ведутся из случайных помещений с шумной аудиторией. В этом случае удается заметно подавить шумы и уменьшить влияние помещений, обычно имеющих большое время реверберации. Для репортажей вне помещения следует использовать микрофоны, которые не подвержены воздействию атмосферных условий.

Приведенный анализ позволяет выбрать такие микрофоны, которым следует отдать предпочтение при проведении речевых передач.

Если это синхронная запись речи или литературно-драматическая передача, лучшим будет микрофон, у которого частотный диапазон не у́же 30÷15 000 Гц, а частотные искажения невелики. Характеристика его направленности должна быть независимой от частоты, обеспечивать широкий угол приема и способствовать снижению воспринимаемого шума. Он должен иметь высокую чувствительность, быть небольшим по размерам и не реагировать на вибрации при перемещении. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают конденсаторные микрофоны с кардиоидной характеристикой направленности. Они же вполне пригодны и для дикторских передач, ведущихся из речевых ателье.

Условиям проведения репортажей из случайных помещений отвечают конденсаторные микрофоны повышенной направленности (гиперкардиоидные или остронаправленные). Они могут применяться и в группе для записи речи движущихся исполнителей, что может уменьшить искажения, появляющиеся при работе такой группы на один канал (см. параграф 6.4).

Если репортаж ведется на открытом воздухе, то лучше для него выбрать менее чувствительный к изменениям атмосферных условий катушечный микрофон однонаправленного или остронаправленного типа.

6.7. Выбор микрофонов для музыкальных передач

Подход к выбору микрофонов для музыкальных передач не отличается от принятого для передач речевого типа. Нужно отобрать такие микрофоны, для которых искажения при восприятии музыки были бы минимальными, а условия работы мало влияли на качество передачи.

Частотный диапазон симфонического оркестра превосходит диапазон речи. Однако его ограничение, как видно из рис. 6.5, на слух менее заметно, чем в случае речевых передач. Отсюда требования к передаче частотного диапазона для музыкальных сигналов может быть несколько снижено. Это особенно относится к духовой и эстрадной музыке, для которой частотный диапазон у́же, чем для симфонической, и укладывается в пределах от 50 Гц до 12 000 Гц (см. параграф 2.6). Что касается нелинейных искажений, то, хотя

для музыкальных передач они являются более нежелательными, чем для речевых, о чем можно судить по рис. 7.9, их рассмотрение здесь не приводится, так как эти искажения для современных микрофонов крайне малы ($k<1\%$).

Условия проведения музыкальных передач очень разнообразны и зависят прежде всего от типа оркестра, ансамбля или отдельного инструмента, выступающего соло (фортепиано, орган и др.).

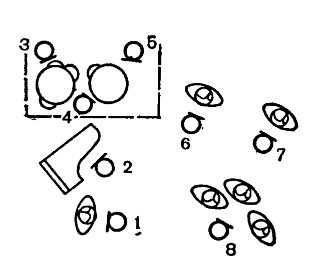


Рис. 6.7. Пример расстановки микрофонов при передаче эстрадной музыки. Микрофоны: *1* — для электрогитары; *2* — для фортепиано; *3*, *4*, *5* — для ритм-группы; *6* — для трубы; *7* — для тромбона; *8* — для саксофонов

Существует мнение, что классическая музыка в исполнении симфонического оркестра благодаря его внутреннему балансу и обычно хорошей акустике музыкальных ателье должна записываться или передаваться с использованием одного достаточно удаленного микрофона с подключением дополнительных при необходимости улучшить естественный баланс оркестра или выделить солистов. Это мнение распространяется и на духовой оркестр.

Для эстрадной, танцевальной или современной популярной музыки считается правильным использование большого числа микрофонов при очень близком размещении их от исполнителей (рис. 6.7). Это связано не только с поиском лучшего внутреннего баланса оркестров, но и с желанием получить характерную для них подчеркнутость музыкальных элементов и придать звучанию неестественный тембр, ставший привычным для этих видов музыкального исполнения.

В отличие от передач в исполнении симфонического оркестра при передаче эстрадной и популярной музыки вокалисты часто передвигаются, что предполагает перемещение соответствующего микрофона.

Передача музыкальных программ ведется чаще всего из специальных ателье и реже из театров и концертных залов. Все эти помещения, как правило, имеют хорошие акустические условия, и только для последних из них характерен повышенный уровень шума, создаваемого публикой.

Как видно из обзора, музыкальные передачи с точки зрения выбора микрофонов можно условно разделить на два вида. К первому относятся передачи классической музыки, а ко второму — передачи музыки эстрадного, танцевального или популярного жанра.

Для первого вида передач наиболее характерным является: а) постоянное размещение исполнителей и микрофонов; б) использование одного или нескольких микрофонов на значительных расстояниях от источника звука; в) ведение передачи из специальных помещений, имеющих малый уровень шумов, оптимальное время реверберации и постоянные атмосферные условия.

Для второго вида передач наиболее характерны: а) возможность перемещения некоторых исполнителей и микрофонов;

б) применение большого числа микрофонов, установленных близко к исполнителям; в) частые случаи проведения передач из шумных помещений (театров, концертных залов).

Рассмотрение особенностей музыкальных сигналов и условий проведения их передач позволяет сказать, что наиболее отвечающим им для первого вида передач является микрофон с круговой характеристикой направленности, мало зависящей от частоты. Такой микрофон способен охватить все группы оркестра, наиболее правильно передать акустическую обстановку помещения, и он не опасен с точки зрения шумов, уровень которых в музыкальных ателье невысок. Кроме того, принимая во внимание удаленность микрофона от исполнителей, нужно, чтобы он имел высокую чувствительность. Таким требованиям отвечает конденсаторный микрофон — приемник давления. В качестве дополнительных могут быть использованы конденсаторные микрофоны одностороннего приема. При недостаточно хорошей акустике студии таким же может быть и основной микрофон. Если учесть меньшую заметность частотных искажений при передачах музыкального типа, то запись или передача симфонического оркестра может выполняться и катушечным микрофоном с соответствующей характеристикой направленности.

Ряд других особенностей конденсаторных микрофонов позволяет рекомендовать их и для передачи эстрадной, танцевальной и современной популярной музыки. К числу этих особенностей относятся малая масса и размеры, что облегчает их перемещение, возможность получать обостренные характеристики направленности (суперкардиоиды и гиперкардиоиды), что исключает прием шумов со стороны публики, позволяет уменьшить, как это видно из формулы (6.5), искажения, обусловленные применением группы микрофонов. Близкое размещение микрофонов к исполнителю требует уменьшения чувствительности вообще, и особенно на низких частотах; такую изменяющуюся чувствительность имеют некоторые марки конденсаторных микрофонов (U-67, U-77 и др.). Наконец, с ними может работать ветрозащитное устройство, исключающее неприятное воздействие взрывных согласных звуков речи при использовании микрофонов на близком расстоянии от вокалистов.

Практически было установлено, что подчеркивание низких частот благотворно сказывается на передаче звучаний духового оркестра. Это обстоятельство и отсутствие в помещениях влияния атмосферных условий позволяют при таких передачах использовать в качестве основного также и ленточный микрофон, приемник градиента давления, при уменьшенном расстоянии его от исполнителей.

Таким образом, при записи или передаче симфонической музыки лучше применять ненаправленные или однонаправленные микрофоны конденсаторного или катушечного типа, для эстрадной, танцевальной и популярной музыки — конденсаторные микрофоны с управляемыми характеристиками направленности и чувствительности, а для духовой музыки — или такие же, как для симфонической, или даже ленточные микрофоны градиента давления.

6.8. Общие рекомендации по выбору расстояния между микрофоном и источником звука

Выбор расстояния, отделяющего микрофон от участника звукопередачи, зависит от многих факторов. Это видно из схемы рис. 6.8, на которой цифрой *I* обозначена группа факторов, относящихся к виду первичных приемников звука, *II* и *III* — факторов, характеризующих условия передачи и приема сигналов, *IV* — факторов, относящихся к художественному замыслу режиссера. Схема показывает, что выбирать расстояния нужно так, чтобы, не утратив качественных особенностей источника каждого вида (музыкального — *М*, голосового — *Г*), увязать их с условиями передачи, приема сигнала и с замыслом режиссера. На выбор расстояния влияет тип оркестра (симфонический — *С*, духовой — *Д*), характер музыкального произведения (классический, романтический или популярный) и характер исполнения (речь, вокал). Это расстояние определяется акустическими характеристиками микрофонов (например, $\Phi(\theta)$) и временем реверберации (T_1) помещения, из которого ведется звукопередача. Оно выбирается с учетом акустической обстановки (T_2), которая относится к передаваемой сцене или эпизоду, с учетом масштаба (*М*) изображения, показываемого на экране, а также тех особенностей, которые позволяют передать переживания героев и драматизм сцены. Задача усложняется при передаче пространственных источников, состоящих из ряда одиночных (оркестры, ансамбли). В этом случае необходимо добиться звуковой прозрачности и музыкального баланса, для чего, как указывалось, применяется большое число микрофонов. Следовательно, решение задачи расчленяется, и вопрос о выборе оптимального расстояния должен решаться в отношении каждого микрофона в отдельности.

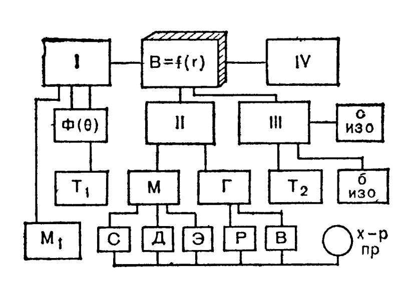


Рис. 6.8. Схема, показывающая влияние различных факторов на зависимость качества звучания от расстояния между исполнителем и микрофоном (*B*)

В настоящее время не существует полностью обоснованных рекомендаций по определению рабочих расстояний между микрофонами и источниками звука. И все-таки знание акустических характеристик тех и других и опыт звукорежиссеров позволяют дать некоторые общие рекомендации, необходимые для такого определения.

Нетрудно установить предельные значения этого расстояния. При речевых передачах и малых расстояниях от исполнителя до микрофона больше замечается различие в мощностях гласных и согласных звуков, подчеркиваются шипящие и свистящие, делается слышным дыхание исполнителя или невольно уменьшается уровень громкости, связанный с подчеркиванием низких частот. В случае музыкальных передач при близком размещении микрофона стано-

вятся слышными удары смычка у струнных и клапанов у духовых инструментов, нарушается баланс в звучании низкого и высокого регистров фортепиано, органа и др. Малые расстояния при использовании микрофонов приемников градиента давления приводят к подчеркиванию низких частот. Все это заставляет считать минимально допустимым расстояние от исполнителя до микрофона при речевых передачах не меньше 0,2÷0,5 м, а при музыкальных — не меньше 0,8÷1,5 м. Это последнее вне зависимости от вида источника звука является минимальным и при применении для звукопередач микрофонов приемников градиента давления.

Учитывая время запаздывания отраженных в помещении сигналов по отношению к прямому, максимально допустимое расстояние между микрофоном и источником звука рекомендуется выбирать не больше полуторной средней длины ($l_{\text{ср}}$) свободного пробега звуковой волны в помещении, которая определяется объемом V этого помещения и площадью S его ограничивающих поверхностей. Таким образом,

$$r_{\text{макс}} \leqslant 1{,}5 l_{\text{ср}} \leqslant 1{,}5 \frac{4V}{S} \leqslant \frac{6V}{S}. \qquad (6.11)$$

Эта величина при оптимальных соотношениях размеров помещения составляет от 0,3 до 0,5 его длины.

Для выбора рабочего расстояния, основываясь на приведенном анализе, можно сделать некоторые общие рекомендации.

1. Расстояние должно выбираться с учетом уровня громкости источника. Чтобы голос казался более интимным, звуковой план более крупным (см. Приложения 3 и 4), микрофон следует располагать близко к исполнителю. Ближе размещаются и маломощные инструменты, например струнные, по отношению к духовым или ударным.

2. Расстояние от источника звука до микрофона уменьшают для снижения уровня передаваемых шумов относительно имеющихся в ателье.

3. Для сохранения неизменным соотношения прямой и отраженной энергии направленные микрофоны (кардиоидные, косинусоидные) следует помещать от источника дальше, чем ненаправленные. Так как для первых из них коэффициент направленности $\Omega = 3$, то увеличение расстояния должно быть в $\sqrt{\Omega} = 1{,}7$ раза. При применении этих микрофонов источники звука нужно располагать тем ближе, чем под бо́льшим углом относительно оси микрофона они находятся.

4. Рабочее расстояние нужно увеличивать в тех помещениях, в которых время реверберации мало и в том случае, когда это время, требуемое для характеристики видимого на экране помещения, больше.

5. Разноплановость звучаний в пределах одного зрительного эпизода или разномасштабность двух следующих друг за другом эпизодов также требует соответствующих изменений рабочих расстояний. В последнем случае при изображении источника звука общим

планом это расстояние нужно выбирать равным 3÷4 м, для среднего плана оно может быть уменьшено до 2 м, а при крупном — примерно до 1 м [2].

Есть и другие практические рекомендации по выбору оптимального размещения микрофонов. Например, сравнивая на слух звучания на выходе двух микрофонов и перемещая относительно источника тот, который дает худшие результаты, можно добиться оптимального положения одного из них [24]. Метод попарного прослушивания микрофонов, работающих в группе, может быть использован и для достижения лучшего акустического или звукового баланса при передаче музыкальных сигналов.

6.9. Влияние вида звуковой информации на выбор расстояния между источником звука и микрофоном

Для определения оптимального расстояния от исполнителя до микрофона более важным, чем общие рекомендации, являются количественные соотношения, позволяющие быстрее и точнее решить конкретную задачу. Такие соотношения были получены нами в результате эксперимента по субъективной оценке качества ряда звучаний, записанных при различных расстояниях между источником звука и микрофоном. Для выполнения опытов был выбран конденсаторный микрофон МК-13М, имеющий переключаемые характеристики направленности, а в программу записи были включены речевые и вокальные звучания, а также звучания фортепиано и малого ансамбля с вокалистом и без него.

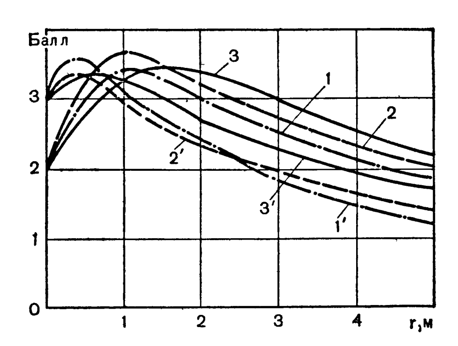


Рис. 6.9. Зависимость качества звучания речи от расстояния источник—микрофон (r) при различной его направленности и T, равном 0,95 и 0,6 с

Результаты опытов по оценке качества звучания дикторской речи приведены на рис. 6.9. Кривые *1*, *2*, *3* соответствуют различным видам характеристики направленности микрофона (круг, кардиоида, косинусоида) и были получены для ателье с временем реверберации равным 0,6. Такие же кривые (*1'*, *2'*, *3'*) были получены и для второго ателье, время реверберации в котором было 0,95 с.

Кривые показывают, что высокое качество звучания речи (оценка 3÷4 балла) может быть получено при расстояниях до 1,5 м и даже до 3 м, как это имеет место для первого ателье. Увеличение его до 5÷6 м снижает качество передачи до удовлетворительной оценки, дальнейшее же увеличение расстояния приводит к недопустимому снижению качества. Как это видно по начальным участкам кривых, очень близкое к микрофону размещение источника звука, так же как и удаленное, снижает качество звучания. Это, очевид-

но, объясняется причинами, рассмотренными выше (см. параграф 6.8).

Более низкое качество звучания почти при всех расстояниях обнаруживается тогда, когда для передачи используется ненаправленный микрофон. Однако применение микрофона одностороннего или двустороннего приема дает сравнительно малое повышение качества — всего только на 0,2÷0,3 балла. Отсюда следует, что, хотя направленные микрофоны и менее критичны к изменению расстоя-

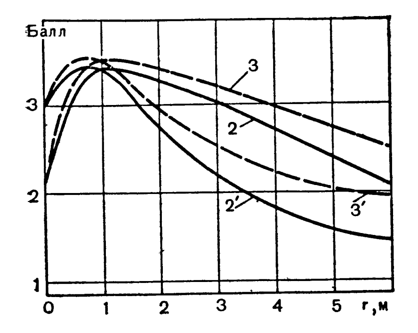


Рис. 6.10. Зависимость качества звучания от расстояния между исполнителем и микрофоном при речевых и вокальных передачах и *T*, равном 0,6 с (*2*, *3*), 0,95 с (*2′*, *3′*)

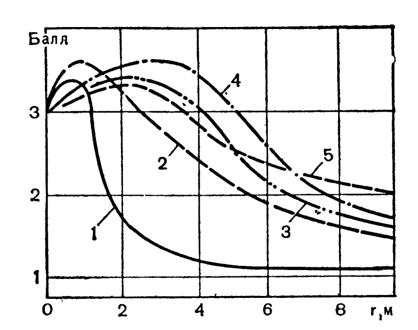


Рис. 6.11. Зависимость качества звучания от расстояния *r* при передаче речи, пения, малого ансамбля, фортепиано в зале с *T*=2,4 с

ния, рассчитывать на значительное изменение качественных показателей при их применении в помещениях с малым временем реверберации вряд ли можно.

Замена одного звукового сигнала другим легко замечается, даже если они являлись родственными. Это можно установить при сравнении кривых *2* и *2′* на рис. 6.10, полученных для передачи дикторской речи из двух указанных ателье, и кривых *3* и *3′*, полученных для тех же помещений, но для голоса в режиме пения. Как следует из рисунка, в каждой паре кривых, соответствующих одному и тому же помещению, кривая для вокального исполнения (*3* или *3′*) располагается выше, чем кривая, отвечающая дикторской речи. Это означает, что при вокальном исполнении влияние расстояния от источника до микрофона на качество звучания уменьшается и одинаковые по качеству передачи певца и диктора могут быть получены при расстоянии, в 1,5 — 2 раза большем для первого из них по сравнению со вторым.

Влияние вида звуковой информации на выбор оптимального расстояния между источником и приемником звука еще более ярко иллюстрируется кривыми рис. 6.11. На нем приведены результаты эксперимента, выполненного в зале, время реверберации в котором было 2,4 с. Кривые *1* и *2* отвечают передаче речи и пения (то и другое — в мужском исполнении), кривые *3* и *4* — передаче звучания малого ансамбля с певцом и без него, кривая *5* — передаче фортепианной музыки.

Анализ кривых на рис. 6.11 приводит к заключению, что оптимальное значение рабочего расстояния для передачи перечисленных выше видов звучаний далеко не однозначно. Для речи это расстояние примерно равно 0,5 м, для пения — 0,8÷1,0 м, для фортепиано — 1,5÷2 м и для ансамбля 2,3÷2,5 м. Кривые для различных видов звучания имеют заметно отличающуюся крутизну. Это означает, что для речи снижение оценки качества звучания ниже удовлетворительного происходит уже при расстоянии около 1,5 м, для пения — при расстоянии, в три раза большем (при $r \approx 5$ м), а для фортепиано и музыкального ансамбля это снижение обнаруживается на расстоянии r около 9 м. Высокая критичность к изменению расстояния при речевых передачах объясняется тем, что для них первостепенную важность представляет семантическая информация, требующая повышенной разборчивости. Этим же объясняется и низкое расположение кривой для пения по сравнению с другими музыкальными звучаниями. Важное значение разборчивости подчеркивается различием хода кривых *3* и *4* для малого ансамбля. Именно сохранение четкости в передаче содержания песни приводит к тому, что кривая для этого ансамбля при наличии певца располагается заметно ниже, чем без него.

То, что оптимальное расстояние при передаче инструментальной музыки больше, а его влияние на снижение качества меньше, чем при передачах речевого или певческого характера, легко объясняется. Первое — тем, что оба источника такой музыки, являясь пространственными, требуют для сохранения музыкального баланса удаления точки приема. Второе — указывает на то, что уменьшение громкости меньше сказывается на музыкальных передачах, чем на речевых. Кстати, нужно заметить, что кривая для ансамбля *(4)* круче, чем для фортепиано (*3*), что указывает на желательность передачи ритмичной музыки с меньшей долей отраженной энергии, т. е. при меньших расстояниях.

Таким образом, эксперимент показал, что выбор расстояния между исполнителем и микрофоном определяется видом звуковой информации. Условия передачи и приема информации и ее творческая обработка также влияют на указанный выбор, что должно учитываться. При речевых передачах указанный выбор ограничивается, с одной стороны, влиянием эффекта ближнего поля, подчеркиванием свистящих и взрывных звуков и шумом самого источника, с другой стороны, снижением разборчивости и искажениями тембра голоса. При музыкальных передачах ограничение определяется, во-первых, эффектом ближнего поля и необходимостью создания музыкального баланса и, во-вторых, достижением акустического баланса и звуковой перспективы, связанных с временем реверберации ателье.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 6.9 — 6.11, позволяют определить оптимальное расстояние от исполнителя до микрофона для некоторых видов звучания при различных типах характеристики направленности приемника и определенных значениях времени реверберации ателье. Влияние последнего будет дополнительно рассмотрено в главе 8.

6.10. Размещение микрофонов при записи или передаче речевых сигналов

Качество речевых передач зависит прежде всего от акустических характеристик голоса исполнителя, микрофона и помещения, из которого ведется передача. Учитывая эти характеристики, нужно построить передачу таким образом, чтобы передаваемый материал отличался высокой разборчивостью и полной естественностью звучания голоса. Это требует установления такого звукового и акустического баланса, который отвечал бы условиям передачи и художественному замыслу. Исходя из этого, все разновидности речевых передач можно объединить в группы информационного и литературно-драматического типа. Они могут проводиться в условиях, когда: а) микрофоны неподвижны и находятся вне или в пределах зрительного кадра; б) одни микрофоны перемещаются, другие остаются неподвижными; в) микрофоны движутся в пределах съемочной площадки.

К *информационному типу* относятся передачи речи диктора, который находится в кадре (телевидение) или вне его (кинематограф, радиовещание), репортажи с места событий, интервью, дискуссии и собрания.

Первые из этих передач ведутся из речевых ателье со специальной акустической обработкой. Диктор остается неподвижным и показывается средним планом или не показывается вовсе. Эти условия позволяют использовать любой микрофон, выбранный для речевых передач, устанавливая его неподвижно на оптимальном расстоянии от исполнителя, которое, как можно судить по рис. 6.9, должно быть порядка $0{,}3 \div 1{,}0$ м.

В случае репортажа или интервью, чтобы добиться высокой четкости речи, снижения шумов и уменьшения влияния акустики неприспособленных помещений, микрофон нужно располагать ближе к исполнителю вплоть до предельно допустимого расстояния, равного $0{,}1 \div 0{,}2$ м. Здесь подходит переносной микрофон, который в случае репортажа может перемещаться вместе с ведущим, а в случае интервью поочередно подноситься ко рту каждого из собеседников. Он должен быть защищен экраном от действия взрывных и свистящих звуков и от движения воздуха.

Дискуссии обычно проводятся в помещениях с оптимальными акустическими условиями, и ее участники в процессе передачи остаются неподвижными. Так как в этих условиях предельно допустимое расстояние от источника до микрофона достаточно велико (до $1{,}0 \div 1{,}2$ м), то охватить группу участников дискуссии удается одним неподвижным микрофоном одностороннего приема, расположенным в центре стола или над ним.

Для собраний устанавливают несколько, обычно однонаправленных, микрофонов: два-пять из них — вблизи оратора, один-два — у ведущего собрание на расстоянии $0{,}2 \div 0{,}5$ м, один — дополнительный — направляют на зал. Последний подключается при смене масштаба изображения говорящего или при передаче реакции

публики (выкрики, аплодисменты). Для большей согласованности звука и изображения ораторов обычно показывают крупным или средним планом.

При проведении *литературно-драматических передач* по телевидению и синхронной записи звука для художественных кинофильмов создание иллюзии реальности сцены требует того, чтобы микро-

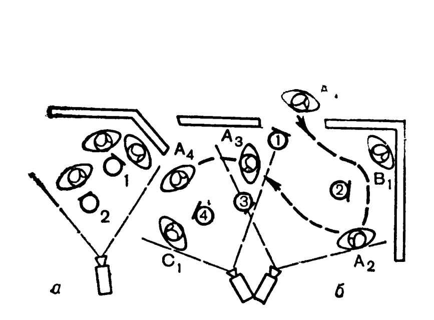


Рис. 6.12. Размещение неподвижных микрофонов при большом расстоянии между исполнителями (*а*) и при движении одного из них (*б*)

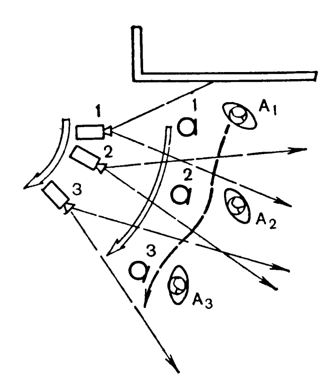


Рис. 6.13. Схема перемещения микрофона и кинокамеры (точки *1*, *2*, *3*) при разных положениях исполнителя (A_1, A_2, A_3)

фоны не были видны в пределах зрительного кадра. Поэтому их устанавливают неподвижно с маскировкой внутри кадра или вне его и перемещают за пределами кадра в любом направлении (горизонтальное, вертикальное и телескопическое панорамирование).

Один неподвижный микрофон используется при записи речи одного или нескольких близко расположенных неподвижных исполнителей, снимаемых в одном масштабе. Два и больше неподвижных микрофонов применяют, когда исполнители или их группы находятся далеко друг от друга (рис. 6.12, *а*) или при изменении масштаба съемки. В этом случае вместе с изменением масштаба поочередно включается то близкий, то удаленный микрофон, что изменяет акустическую окраску звучания.

С помощью нескольких неподвижных микрофонов ведут передачи и тогда, когда исполнители поворачиваются спиной к зрителю или перемещаются (рис. 6.12, *б*), и т. д.

Количество неподвижно установленных микрофонов можно уменьшить, если те из них, которые принимают сигналы от движущегося исполнителя (например, микрофоны *1*, *2* и *3* на рис. 6.12, *б*), будут заменены одним-двумя перемещающимися. Стало быть, неподвижные микрофоны должны обслуживать тех исполнителей, которые в течение съемки не покидают своих мест, а перемещающиеся микрофоны — сопровождать движущихся исполнителей или камеру при ее наездах и перемещениях (рис. 6.13).

Только перемещающиеся микрофоны используют при съемке движущихся объектов крупным или средним планом. В этом случае, чтобы сохранить неизменным звуковой и акустический баланс, микрофоны вместе со съемочной камерой должны двигаться рядом с источником звука. Следует иметь в виду, что при панорамировании микрофоны приходится перемещать, чтобы убрать их из кадра. При этом расстояние между источником и приемником звука может оказаться больше оптимального.

Нужно предостеречь от использования некоторых способов повышения реальности передаваемой сцены. Нельзя, например, часто изменять акустическую обстановку при каждом изменении масштаба изображения, особенно если это происходит в пределах одного кадра. Такие изменения раздражают зрителя. Нужно помнить, что эффекта изменения расстояния следует достигать прежде всего изменением тембра речи и ее акустической окраски, а не изменением громкости, связанным с потерей разборчивости. Пользуясь несколькими микрофонами, нужно так размещать их относительно друг друга, чтобы уменьшить возможность приема каждым из них сигнала от того из источников, на который работает другой (см. параграф 6.4.).

6.11. Размещение микрофонов при передаче музыкальных сигналов

Уже отмечалось, что главным для речи является передача семантической информации или семантической и эстетической с преобладающим значением первой из них, как это имеет место в отношении литературно-драматических передач и художественных кинофильмов. В случае музыкальных передач доминирующую роль играет эстетическая информация. Передача ее осуществляется различными ансамблями и оркестрами, состоящими преимущественно из одних и тех же инструментов. Для них, как и для речи, принципиальное значение имеет поиск звукового и акустического баланса, который исходит из сложившегося уже подхода к передаче музыкальных звучаний.

Этот подход в отношении классической музыки заключается в стремлении передать ее такой, какой она воспринимается при непосредственном слушании в концертном зале. При этом принимается во внимание присущий ей естественный звуковой баланс, который, так же как и соответствующий лучшим местам этого зала акустический баланс, должен быть обязательно сохранен звукорежиссером.

Другого решения требует эстрадная и современная музыка, идущая по пути создания резкого, эффектного и даже неестественного звучания. В этом случае роль акустического баланса сводится к минимуму, а звуковой баланс создается звукорежиссером, так как внутренний баланс у современных ансамблей часто не соблюдается.

И, наконец, особого подхода требует передача музыки для кинофильмов. Стремление усилить эмоциональную настроенность, создаваемую изображением, вскрыть музыкальными средствами не вы-

раженные им побуждения героев и их душевные черты часто требует разноплановости звучания (см. Приложение 4), нарушения музыкального баланса с особым подчеркиванием и даже искажением отдельных звучаний. Такое сочетание сбалансированного и разбалансированного в музыкальном и акустическом плане звучаний приводит к необходимости выделить киномузыку в отдельную группу.

Так как сохранение или создание звукового и акустического баланса практически связано с определением типа и числа микрофонов, с их размещением относительно исполнителей, то наличие у оркестров классической музыки внутреннего звукового баланса позволяет ограничить число микрофонов и при подготовке к передаче отдать больше внимания созданию акустического баланса и звуковой перспективы.

Акустический баланс может быть обеспечен с помощью одного общего микрофона, достаточно удаленного от исполнителей. В случае камерного ансамбля или группы его устанавливают на расстоянии $2 \div 3$ м от ближайших источников звука. При передаче звучания большого оркестра это расстояние увеличивают до $4 \div 7$ м. Чтобы охватить весь оркестр, в качестве общего выбирают микрофон, имеющий круговую или кардиоидную характеристику направленности. Более полному охвату инструментов оркестра и улучшению музыкального баланса способствует подъем микрофона вверх на расстояние $1{,}8 \div 3$ м от пола.

Необходимая звуковая перспектива может быть получена для малых ансамблей при глубине размещения музыкальных инструментов в пределах до 3 м. В больших оркестрах наиболее удаленные инструменты размещаются на расстоянии $4 \div 6$ м от фронтальной линии оркестра, что создает естественное впечатление о расположении групп оркестра в звуковом пространстве. Для улучшения музыкального баланса положение общего микрофона следует выбирать по рекомендациям параграфа 6.3. При участии в передаче солистов для лучшего музыкального баланса и с некоторым ущербом для звуковой перспективы их располагают ближе к микрофону, чем при концертном исполнении. Расстояние между певцом и микрофоном сокращается до $0{,}8 \div 1{,}5$ м. Названные рабочие расстояния являются ориентировочными и должны корректироваться с учетом вида музыкального произведения и акустических характеристик ателье или студии, из которой ведется передача.

В практике часты случаи использования кроме общего еще и ряда дополнительных микрофонов. Их, например, устанавливают для выделения звучания солирующего инструмента или певца в общем звучании оркестра. Дополнительные микрофоны с соответствующим усилением сигнала используют при нарушении музыкального баланса или для подчеркивания по замыслу звукорежиссера звучания той или иной инструментальной группы. Пример размещения дополнительных микрофонов при записи симфонического оркестра показан на схеме рис. 6.14, где эти микрофоны расположены перед группами скрипок, альтов и виолончелей, контрабасов, медных, деревянных и ударных инструментов.

Джазовая и современная популярная музыка в силу указанных ее особенностей требует для звукопередачи применения большого числа микрофонов. Конкретное решение этого вопроса зависит от типа оркестра. В основе каждого из них лежит ритмическая группа инструментов, состоящая из ударной установки, контрабаса и фортепиано (иногда с гитарой, банджо или вибрафоном). Состав дру-

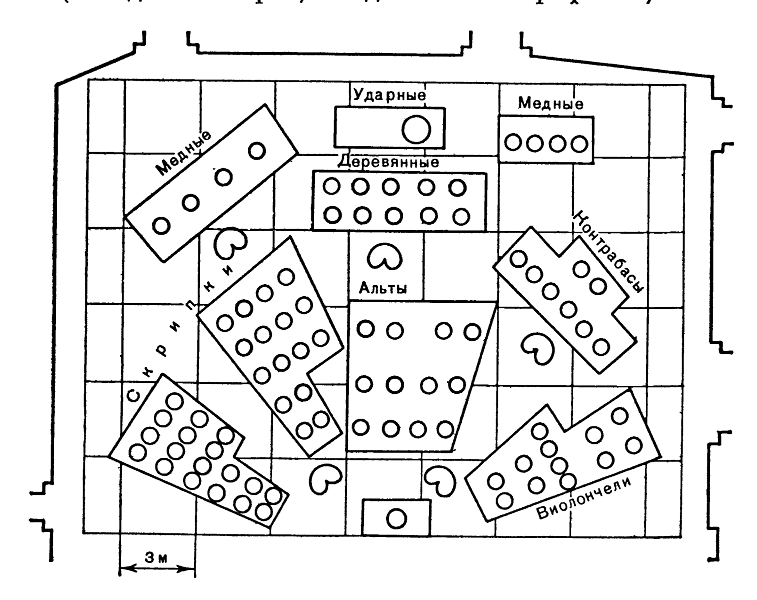


Рис. 6.14. Размещение микрофонов при передаче симфонической музыки

гой — мелодической — группы в разных ансамблях неодинаков. В него входят 2—3 духовых инструмента в малых ансамблях («модерн-джаз», «диксиленд»), 12—15 — в танцевальном («свит») и 15—25 — в эстрадном оркестре.

Сходство в требованиях к джазовой музыке и в структуре построения ансамблей приводит к тому, что схему размещения микрофонов для танцевального оркестра (рис. 6.15) можно считать типичной для всех ансамблей этого вида. Добиваясь высокой подчеркнутости и ритмичности звучания музыки, для каждого из инструментов ритм-группы выделяют отдельный микрофон, который работает на расстоянии 0,2÷0,5 м и меньше. Для инструментов мелодической группы в малых ансамблях также используют индивидуальные микрофоны (см. рис. 6.7), в больших же (рис. 6.15) устанавливают по одному микрофону (*7*, *8*, *10*) для 2—3 рядом сидящих исполнителей. Большое количество микрофонов усиливает опасность приема каждым из них сигналов от соседних источников звука, а потому инструменты размещают подальше один от другого и между ними ставят защитные экраны. Если музыканты еще и поют, то для них используют дополнительные микрофоны, солирую-

щий же певец имеет переносной микрофон, работающий на расстоянии 0,1 ÷ 0,4 м.

Характерным для передачи популярной музыки является использование группы электроинструментов, часть из которых (ритм- и бас-гитара) вместе с ударной установкой создает ритм-группу, другая часть вместе с певцами входит в мелодическую группу. Еще

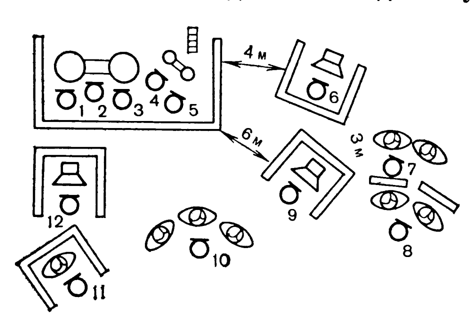


Рис. 6.15. Размещение микрофонов при передаче танцевальной музыки

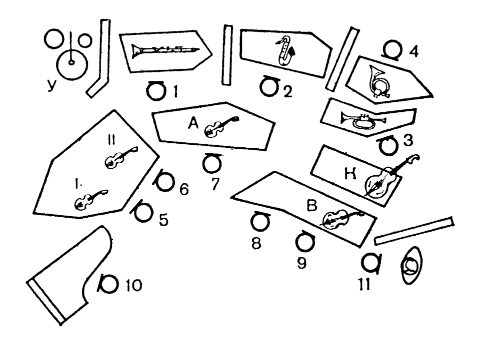


Рис. 6.16. Схема записи музыки в киноателье: *I*, *II* — первые и вторые скрипки; *А* — альты; *В* — виолончели; *К* — контрабасы

бóльшая, чем в джазовой музыке, ритмическая подчеркнутость звучания приводит к увеличению числа микрофонов, принимающих сигналы от ударной установки (микрофоны *1*, *2*, *3*, *4* и *5* на рис. 6.15), и к большей изолированности источников звука (громкоговорителей, работающих от электромузыкальных инструментов и работающих на них микрофонов *6*, *9*, *12*). Для записи такой музыки часто применяют безмикрофонный метод, при котором сигналы от электромузыкальных инструментов передаются сразу на пульт звукорежиссера, где они подвергаются смешиванию.

Применение большого числа микрофонов при передаче джазовой и популярной музыки делает возможным управление звуковым балансом путем изменения расстояния между источником и микрофо-

ном или путем изменения уровней отдельных сигналов на звукорежиссерском пульте.

Особенность музыки для художественных кинофильмов связана с сознательным нарушением звукового и акустического баланса, звуковой перспективы, включая и разрушение единства звукового плана. Эти нарушения непостоянны — они делаются по необходимости в процессе звукозаписи. Поэтому при записи киномузыки рекомендуется прибегать к использованию многомикрофонной техники (рис. 6.16). Микрофоны то обслуживают несколько групп инструментов (микрофоны *8*, *9* и *5*, *6*), то одиночные их группы (микрофоны *1*, *2*, *3*, *4* и *7*), а то и отдельных исполнителей (микрофоны *10* и *11*). Все это позволяет в процессе записи управлять указанными выше звуковыми параметрами с пульта звукорежиссера, добиваясь нужного художественного эффекта.

Большое разнообразие источников звука, условий их работы, характеристик передающих систем указывает на то, что существует много композиционных вариантов решения каждой конкретной задачи, касающейся взаимного размещения исполнителей и микрофонов. Очевидно, что выбор наиболее приемлемого из этих вариантов определяется творческим поиском и опытом звукорежиссера. Знание общих положений, сформулированных выше, может ему в этом помочь.

Глава 7.

ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗВУКОВЫМИ СИГНАЛАМИ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПЕРЕДАЧИ, ЗАПИСИ И ПЕРЕЗАПИСИ

7.1. Управление уровнями сигналов при их записи или передаче

Первый этап управления, связанный с нредварительной обработкой сигналов, позволяет в основном установить нужные соотношения их уровней или соотношения прямой и отраженной энергии. Для высококачественной звукопередачи этого недостаточно. Требуется оперативное управление в процессе передачи, в частности для того, чтобы изменять соотношение уровней сигналов ряда одновременно работающих источников звука или их групп. Оно необходимо для выравнивания громкостей на стыках программ, записанных в разное время, и выбора уровня громкости с учетом условий звуковоспроизведения. Отсюда следует, что оперативное управление должно осуществляться во всех звеньях и на всех этапах передачи звукового сигнала. Вот почему регуляторы уровней сигналов включаются в цепь одного или группы микрофонов, каждого канала, объединяющего звучания различных инструментов и их групп, на выходе всех каналов, в цепи пультов перезаписи и звуковоспроизведения.

Поэтапное управление с помощью индивидуальных *(ИР)*, групповых *(ГР)* и общего *(ОР)* регуляторов уровней пульта записи, как это видно из диаграммы уровней передающего тракта (рис. 7.1), позволяет наилучшим образом сформировать и передать сложный сигнал.

Регуляторы уровней могут осуществлять плавное или ступенчатое изменение уровней сигналов. В последнем случае переход с одной ступени на другую изменяет уровень на величину не более 0,4÷0,6 дБ. Общий предел изменения уровней сигналов составляет 60÷90 дБ. Важно, чтобы при использовании регуляторов уровней не изменялись другие параметры сигнала, а сам процесс регулирования не замечался во время прослушивания.

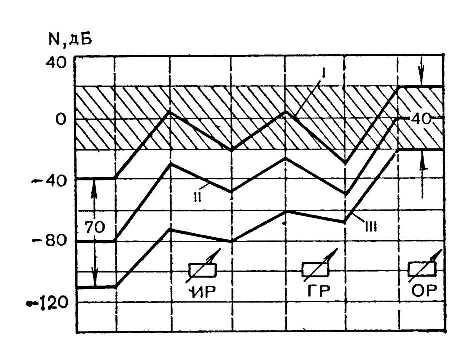


Рис. 7.1. Управление уровнями сигналов (*I, II, III*), составляющих сложное звучание

При речевых передачах с использованием одного микрофона регулятор уровня необходим для поддержания громкости различных по мощности одиночных голосов на некотором среднем уровне или для передачи речи одиночного исполнителя, перемещающегося

по глубине съемочной площадки, в том случае, если масштаб изображения не меняется. При этом изменение уровня речевого сигнала должно сопровождаться изменением акустического отношения и не быть чрезмерным, чтобы речь не теряла своей четкости. Эффект перемещения исполнителя по глубине может быть достигнут только изменением уровня сигнала при условии, что оно происходит на открытом воздухе и не в больших пределах.

При большом количестве исполнителей и неподвижной установке микрофонов (см. рис. 6.12, *а*) регуляторами пользуются в цепи каждого канала для выбора уровней, которые соответствовали бы условиям размещения отдельных групп исполнителей. Если при этих условиях исполнители поворачиваются или ходят (см. рис. 6.12, *б*), то регулятор уровня в цепи микрофона, от которого исполнитель отдаляется, плавно выводится при одновременном плавном вводе регулятора, работающего с микрофоном, к которому он приближается.

Когда ведутся музыкальные передачи, индивидуальными регуляторами можно выравнивать уровни сигналов однотипных источников, что приводит к полному использованию их мощности и делает их общее звучание более богатым и сочным. Групповые регуляторы позволяют уточнить звуковой баланс и четче обозначить звуковые планы оркестрового звучания. Пользуясь же одновременно теми и другими, можно выделить солистов или отдельные группы инструментов и тем самым изменить звуковой план или усилить драматизм передаваемых событий. Регуляторы уровней при передаче джазовой и современной музыки позволяют выделить звучание основных певцов или тех из них, которые одновременно играют на ударных инструментах. Они усиливают голос певца, когда он, чтобы придать звучанию интимный характер, понижает уровень громкости и очень приближает к себе микрофон.

Регулирование уровней широко используется в драматических передачах и при записи звука для художественных, научно-популярных и хроникальных фильмов. Оно необходимо для правильного и художественно оправданного сочетания речи в режиме дикторского и художественного исполнения, речи и шумов, речи и музыки. В радиовещании, например, регулирование используется при переходе от одной сцены к другой или от речи комментатора к речи действующих лиц. В обоих случаях первый сигнал постепенно ослабляется, а второй после короткой паузы постепенно усиливается.

Шумы в постановках и фильмах обычно характеризуют место или время действия либо напоминают о связи данной сцены с дру-

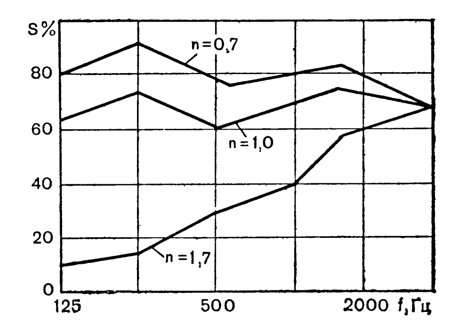


Рис. 7.2. Зависимость разборчивости речи ($S\%$) от частоты при разном соотношении уровней фоновой музыки и речи (n)

гой. Они то уменьшаются, то усиливаются регуляторами уровней вместе с появлением или исчезновением речевого сигнала, а также в интервалах между диалогами различных групп исполнителей, действующих в одной и той же обстановке.

Регуляторы используются, когда музыка сменяет речь, выполняя связующую роль между двумя игровыми сценами, и когда она служит фоном при проходах исполнителей или звучит для того, чтобы охарактеризовать обстановку самой сцены. Фоновая музыка используется также для сопровождения дикторской речи в научно-популярных и хроникальных фильмах. В этом случае уровень музыкального сигнала должен снижаться при появлении речевого так, чтобы разборчивость речи оставалась достаточно высокой. Соотношение уровней фоновой музыки и речи (n) можно определить по рис. 7.2. Хорошая разборчивость сохраняется еще тогда, когда указанное соотношение равно $0{,}6 \div 0{,}7$ или же когда уровень музыкального сопровождения на $3 \div 4$ дБ ниже уровня речи.

7.2. Управление уровнями сигналов в процессе перезаписи звука

Управление уровнями сигналов на этапе последующей обработки упрощается, если предполагается, что окончательная обработка сигналов будет выполнена методом перезаписи или наложения.

В условиях звукового кинематографа перезапись звука является обязательной и призвана объединять звучания речи, музыки и шумов, запись которых осуществлялась раздельно. Разделение звукового материала по каналам системы перезаписи делают так, чтобы через каждый канал проходили сигналы, управление которыми можно проводить одновременно. Оперативное управление сигналами в этом случае преследует цель не только правильно соединить эти сигналы, но и сделать это так, чтобы они, сливаясь с изображением, усиливали бы драматизм сцены, полнее раскрывали образ героя.

Регулятор уровней, включенный в цепь речевого канала, призван выравнивать громкости на стыках звукового материала, записанного в разное время, для чего при передаче средней по громкости речи устанавливают одинаковую глубину модуляции порядка $50 \div 60\%$. Относительное изменение этого уровня производится тем же регулятором в соответствии с характером сцены, изображаемой на экране. Вместе с этим регулятором звукорежиссер пользуется другими, работающими в цепи каждого канала. Выбор и изменение уровней сигналов в них тесно увязывается с характером изображения, и все-таки главным при этом является высокая разборчивость речи. Вот почему уровни связывающей и фоновой музыки, и тем более шумов, должны подбираться так, чтобы выполнялось это основное требование. Чрезмерное подчеркивание неречевых составляющих общего звучания допустимо только тогда, когда драматическая обстановка позволяет полностью заменить реплики исполнителей специально записанной музыкой или когда имеет место чередование реплик, шумов и музыки.

При перезаписи временно́е совпадение совместно регулируемых сигналов достигается монтажом фонограмм для каждого канала, а последовательность регулировок определяется специальной их росписью (микшерским паспортом), составленной по изображению.

В отличие от метода перезаписи *метод последовательного наложения*, как это следует из его названия, предполагает, что записанный материал как бы нанизывается постепенно на звучание основного сигнала. Этот метод получил развитие при записи современной музыки. В качестве основы записывается звучание ритм-группы, на которое последовательно накладывается звучание инструментов мелодической группы и пение в исполнении одних и тех же участников ансамбля. Это позволяет с малым числом исполнителей получить эффект звучания большого оркестра и нужным образом выделить певцов или солистов. Регулировка уровней в этом случае ничем не отличается от многомикрофонной или многоканальной записи музыки.

Важно отметить, что создание сложных звучаний методом перезаписи или наложения экономически выгодно, так как эти методы не требуют длительного использования больших групп исполнителей высокой квалификации.

7.3. Ручное управление динамикой передаваемых звучаний

Натуральные источники звука имеют динамический диапазон, укладывающийся в пределах 70÷80 дБ (см. главу 2). Передача такого широкого диапазона ограничена техническими возможностями звукопередающей системы: с одной стороны — шумами, с другой — чувствительностью ее к перегрузкам, которые влекут за собой появление нелинейных искажений. Указанные ограничения приводят к тому, что диапазон передачи сокращается до 35÷40 дБ. В связи с этим перед звукорежиссером возникает задача передать по возможности все динамические различия драматических или музыкальных звучаний, не выходя за пределы динамического диапазона системы. Эта задача решается методом ручной или автоматической регулировки уровней сигналов.

При ручном регулировании в случаях, когда диапазон передаваемого звучания вследствие высокого уровня одного из источников (взрыв, грохот машины) излишне широк, для этого источника выделяется отдельный канал, в котором ручной регулировкой сигнал подавляется до нужного уровня. В случае же, когда выход за пределы допустимого диапазона связан с большим разнообразием уровней ряда составляющих сложного сигнала, сначала общим регулятором устанавливают его средний уровень. Потом с помощью поканальных регуляторов усиливают или ослабляют отдельные составляющие так, чтобы на выходе пульта исключить перемодуляцию. Как видно из рис. 7.1, ряд составляющих *I, II* и *III* сложного сигнала, отличающихся по уровням на 70 дБ, с помощью регуляторов можно уложить в диапазоне передающего устройства равном 40 дБ.

Если различие в уровнях обусловлено только динамикой самого произведения, то сигнал, когда он подходит к максимальному уровню, подавляется с помощью общего регулятора так, чтобы максимум уложился в пределах диапазона системы.

Важное значение имеет правильный выбор среднего уровня передачи, что делается на слух во время репетиций. Такой выбор уровня, как видно на рис. 7.3, *а*, уменьшает необходимость часто

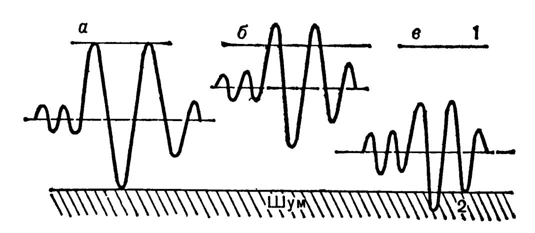


Рис. 7.3. Выбор среднего уровня передачи: правильный (*а*), завышенный (*б*), заниженный (*в*); *1*, *2* — границы динамического диапазона тракта

пользоваться индивидуальными и общими регуляторами в процессе передачи. Они оказываются ненужными до тех пор, пока динамические различия сигнала не превышают динамический диапазон системы (линии *1*,-*2*). Неправильный выбор среднего уровня передачи не только усложняет работу с регуляторами, но и ухудшает общие результаты. Если средний уровень выбран с превышением (рис. 7.3, *б*), то вместе с увеличением уровня громкости это уменьшает возможность создания нужных динамических градаций при передаче звучаний. Снижение среднего уровня хотя и позволяет шире изменять эту динамику, однако это приводит к уменьшению средней громкости и грозит увеличением уровня шумов (рис. 7.3, *в*).

Слуховой аппарат не может установить различие в уровнях сигналов, если они разделены значительными интервалами времени. Зато он хорошо замечает кратковременные динамические контрасты. Следовательно, важно передать не весь динамический диапазон данного произведения, а только его кратковременные динамические перепады. Небольшие перепады при правильном выборе среднего уровня могут уложиться в пределах диапазона системы, что же касается больших, то здесь может быть использован прием, рекомендованный рядом опытных звукорежиссеров [2, 24]. Если указанное различие велико и кривая *1* уровня передаваемого сигнала (рис. 7.4) выходит за пределы N_1 допустимого диапазона, то устранить перемодуляцию можно ручной регулировкой по кривой *2*. Однако в этом случае снизился эффект звукового контраста. Чтобы сохранить его, незадолго до максимального выброса сигнала снижают средний уровень передачи, а потом после максимума поднимают его по кривой *3*. Снижение и подъем среднего уровня делают ступенями по 2 дБ через промежутки времени в 5÷10 с. Создать впечатление о расширенном динамическом диапазоне можно и для сигналов малых

уровней. В этом случае (кривая *3* на рис. 7.5) сначала средний уровень понижают, а потом постепенно повышают его.

Повышение звукового контраста при кратковременном усилении сигнала добиваются с помощью вертикального панорамирования. При появлении сигнала большой силы принимающий его микрофон

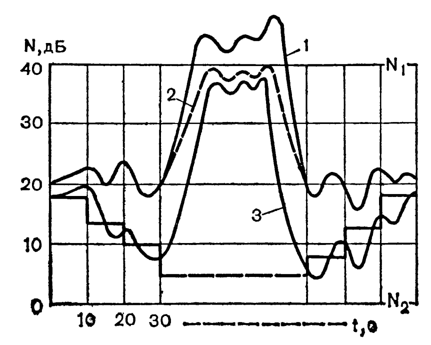


Рис. 7.4. Создание динамических контрастов. Правильная (*3*) и неправильная (*2*) регулировка уровней сигнала (*1*)

Рис. 7.5. Управление уровнями сигнала. Сигнал до и после регулировки (*1*, *2*), регулировочная кривая (*3*), границы диапазона (N_1, N_2)

быстро поднимают вверх, что приводит к относительному возрастанию принятой отраженной энергии и создает впечатление о большем уровне громкости. Подобный эффект получается и при перемодуляции на 20÷30%.

Изложенное можно сформулировать в виде кратких выводов.

1. Управление уровнями позволяет не только улучшить звуковой баланс, создать нужный звуковой план, сделать незаметными переходы для фонограмм, записанных в разное время, но и сжать динамический диапазон передачи, усилить ее динамические контрасты.

2. При малом различии в диапазонах звуковой программы и передающей системы соответствие между ними достигается сжатием первого из них с помощью общего регулятора уровней.

3. В сложном звучании для сигналов высокого уровня выделяют отдельные каналы, где они подавляются до необходимой величины.

4. Для передачи больших динамических контрастов следует до появления наиболее громких пассажей снизить средний уровень передачи так, чтобы уложить их в пределах диапазона системы.

5. Небольшой динамический контраст можно получить при некоторой перемодуляции или вертикальном панорамировании микрофона.

7.4. Автоматическое управление динамическим диапазоном

Большое число операций, ложащихся на ручную регулировку, часто не позволяет звукорежиссеру выполнять их своевременно и с высоким качеством. Часть операций по управлению параметрами

сигналов, подчиняющимися определенным закономерностям, перекладывается на автоматические устройства. Одним из таких параметров является динамический диапазон, управление которым осуществляется усилителем с переменным коэффициентом усиления, называемым *компрессором.*

На рис. 7.6, *а* приведена кривая изменения уровней передаваемого сигнала. На отрезке времени $t_1 - t_2$ эти уровни выходят за

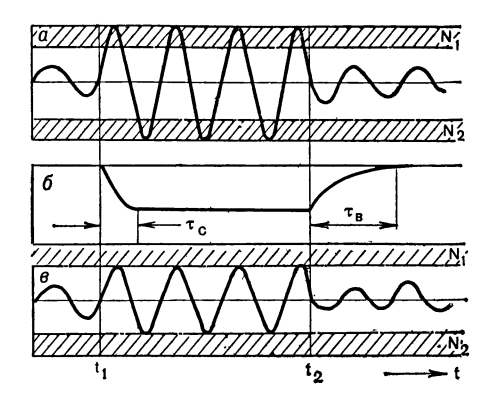


Рис. 7.6. Кривые входного (*а*), управляющего (*б*) и выходного (*в*) сигналов при работе компрессора

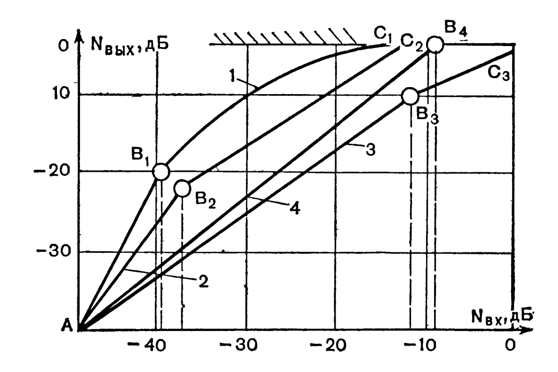


Рис. 7.7. Типы регулировочных характеристик компрессора

пределы N_1 и N_2 динамического диапазона передающей системы. Если их передавать не с постоянным усилением, характеризуемым наклоном линии AB_4 (рис. 7.7), а начиная с некоторого уровня $U_{мин}$ (с точки B) уменьшить коэффициент усиления так, как показано, например, линией B_1 C_1, то изменение уровня сигнала на выходе такого устройства будет представляться кривой (см. рис. 7.6, *в*), укладывающейся в пределах динамического диапазона системы. Точки B_1, B_2, B_3, B_4 соответствуют порогу срабатывания компрес-

сора, а кривые, начинающиеся в этих точках, называются *регулировочными характеристиками.*

Если динамический диапазон программы не очень велик, то *коэффициент сжатия*

$$\gamma = \frac{N_{\text{вых}}}{N_{\text{вх}}}$$

выбирают порядка 0,5, при большем диапазоне его можно изменить до значения $\gamma = 0{,}05$. Часто вместо коэффициента сжатия употребляют понятие *величины компрессии*, которая обратна коэффициенту сжатия и выражается численно в виде 2:1, 3:1 или в виде 20 дБ в 10 (2:1); 30 дБ в 10 и т. д.

Если исходный сигнал изменяется очень резко, то соответствующее ему быстрое изменение усиления в цепи управляющего сигнала будет вызывать помехи в виде щелчков. Для устранения их в момент срабатывания компрессора включаются линии задержки, замедляющие изменение управляющего сигнала. Его кривая в связи с этим нарастает в течение времени $\tau_с$ и восстанавливается за время $\tau_в$, как это показано на рис. 7.6, *б*. Однако эта инерционность системы способна в динамическом режиме вносить искажения, характерные для переходных процессов. Они проявляют себя главным образом в виде разностных комбинационных тонов, которые крайне нежелательны, так как очень хорошо обнаруживаются слухом.

Временны́е характеристики компрессора (время срабатывания $\tau_с$ и время восстановления $\tau_в$) не остаются постоянными, а изменяются в соответствии с крутизной выбранной регулировочной характеристики. При большем динамическом диапазоне передаваемого звучания следует выбирать не только большую величину сжатия (например, 50 дБ в 10), но и соответственно большие значения для $\tau_с$ и $\tau_в$.

Результаты работы компрессора зависят еще от положения точки *B* (точки перегиба) на регулировочной кривой. Снижение этой точки приводит к подчеркиванию все более низких по уровню сигналов и часто используется при необходимости выделения шумов, служащих фоном для данной сцены, или пения на фоне оркестрового звучания.

Таким образом, режим работы компрессора определяется наклоном регулировочной характеристики, положением на ней точки перегиба и временем срабатывания и восстановления. Все эти параметры выбираются с учетом динамического диапазона программы или исходя из типа передачи. В частности, считается, что при записи речевых программ оптимальной регулировочной характеристикой является та, для которой величина сжатия соответствует 20 дБ в 10, а временны́е параметры имеют значения: $\tau_с = 0{,}5 \div 2{,}0$ мс и $\tau_в = 0{,}2 \div 0{,}5$ с. Для музыкальных передач рекомендуется величину сжатия выбирать 20 дБ в 2 (10:1), $\tau_с = 1 \div 3$ мс и $\tau_в = 0{,}5 \div 2$ с.

Часто компрессоры делят на группы (см. рис. 7.7):

а) собственно компрессоры, имеющие наибольшую крутизну

регулировочной кривой (2:1÷5:1) со сниженной точкой перегиба (кривая *2*);

б) ограничители, для которых регулировочная кривая имеет малую крутизну (10:1÷20:1) и точка перегиба поднята высоко (кривая *3*);

в) пикосниматели, у которых точка перегиба *(В)* поднимается почти до границы динамического диапазона системы, а регулировочная характеристика занимает горизонтальное положение (кривая *4*).

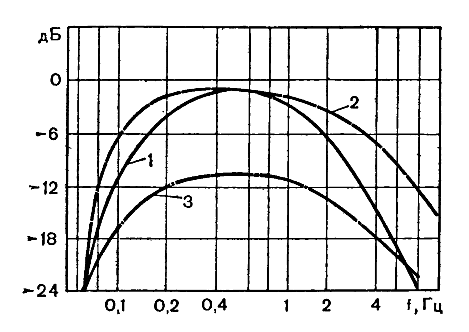


Рис. 7.8. Спектр речевого сигнала без компрессии (*1*), с компрессией при 100%-ной (*2*) и 30%-ной (*3*) глубине модуляции

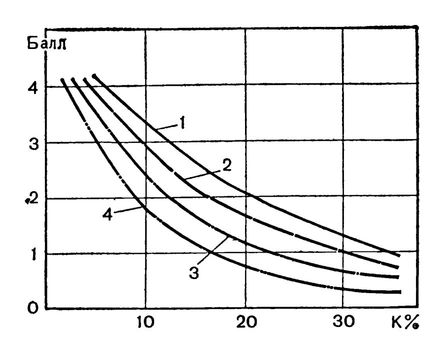


Рис. 7.9. Заметность квадратичных (*1, 3*) и кубичных (*2, 4*) нелинейных искажений при речевых (*1, 2*) и музыкальных (*3, 4*) передачах

Обычно, чтобы исключить перелом регулировочной кривой, коэффициент усиления компрессора делают переменным, что превращает линейный ее отрезок в криволинейный (кривая *1*).

Сжатию уровней сигналов, связанному с динамическим изменением усиления, сопутствует ряд искажений. Чем больше сжатие, тем выше становится средний уровень передачи. Субъективно это приводит к увеличению уровня громкости с характерным для этого случая усилением низкочастотных и высокочастотных составляющих сигнала (см. рис. 4.1). Непропорционально большое сжатие высоких уровней приводит к относительному усилению сигналов с малыми уровнями. Так, например, если частотный спектр речевого сигнала имел вид кривой *1* (рис. 7.8), то после сжатия его спектр изменяется в соответствии с кривой *2*. Появляются частотные искажения.

При малой величине сжатия общее усиление сигнала и некоторое выделение его низко- и высокочастотных составляющих (кривая *3*) улучшает разборчивость речи и делает ее более естественной. Значительное же сжатие приводит к частичной потере формант и к неприятному подчеркиванию шипящих и свистящих звуков, к повышению уровня шумов как самой передающей системы, так и внешних, связанных, например, с записью звука в ателье синхронной киносъемки. Шумы особенно неприятны в паузах речи, когда время восстановления $\tau_в$ было выбрано излишне большим. ?

Автоматическое сжатие уровней влияет и на качество музыкальных передач. Это выражается в нарушении музыкального баланса и звуковой перспективы. Особое внимание требуют появляющиеся при сжатии нелинейные искажения, ибо они, как показывают кривые рис. 7.9, становятся очень заметными именно при музыкальных передачах. Заметность квадратичных и кубичных искажений при музыкальных передачах (кривые *3*, *4*) больше, чем при речевых (кривые *1* и *2*).

Как показывают измерения, нелинейные искажения, обусловленные сжатием, составляют величину порядка 2%; искажения же разностного тона, появляющиеся при сжатии вследствие возникновения переходных процессов, во много раз превосходят эту величину, да и воспринимаются на слух они более неприятно, чем гармонические.

Все это заставляет пользоваться методом автоматического сжатия с большой осторожностью. В случае речевых передач допускается сжатие не более чем на $10 \div 15$ дБ соответственно для женских и мужских голосов. Для джазовой и популярной музыки оно должно быть не бóльшим $6 \div 12$ дБ и для симфонической музыки — не бóльшим $3 \div 5$ дБ. Чрезмерное сжатие используется иногда в популярной музыке для создания необычных звучаний.

Для устранения искажений, возникающих при автоматическом сжатии диапазона, применяются шумоподавители, частотные корректоры, устройства для смещения начальной точки регулирования. Они позволяют увеличить сжатие до 20 дБ и уложить большинство звучаний в пределах диапазона передающей системы. Одновременное ручное управление допускается только для усиления динамических оттенков звучания. Компрессоры включаются прежде всего в цепи тех каналов, в которых могут появляться очень большие сигналы. На выходе же системы компрессор включают при необходимости одновременно подавить все сигналы сложного источника, например при максимальной громкости звучания всего симфонического оркестра.

Приведем ряд общих выводов по этому разделу.

1. Применение компрессора освобождает звукооператора от заботы о перегрузке системы и позволяет ему сосредоточить внимание на художественной стороне управления сигналами.

2. Сжатие диапазона осуществляется управлением тремя параметрами компрессора: крутизной наклона регулировочной кривой, положением точки перегиба и временем срабатывания и восстановления.

3. При уменьшении крутизны регулировочной кривой степень сжатия растет, а динамика звучания все больше нивелируется.

4. Снижение точки перегиба приводит к сжатию диапазона, начиная с меньших по уровню сигналов. Это поднимает средний уровень передачи, подчеркивает более тихие звуки и усиливает шумы.

5. Время срабатывания и восстановления выбирают таким, чтобы щелчки срабатывания были неслышными, а шумы наименьшими.

6. Величину компрессии следует выбирать в соответствии с изменением динамики каждого нового элемента программы передачи.

7.5. Управление шириной частотного диапазона

Желание иметь частотную характеристику передающей системы, сочетающую в себя характеристики всевозможных источников звука, кажется вполне закономерным. Ведь в этом случае можно было бы не задумываясь переходить от передачи одной программы к любой другой. Однако излишняя ширина частотного диапазона системы в ряде случаев снижает качество звучания. Использование ограничительных фильтров оказывается полезным при передаче многих речевых и музыкальных программ, а также для создания ряда звуковых эффектов.

Ограничение частотного диапазона передачи со стороны низких и высоких частот используется для подавления шумов, могущих возникнуть в системе звукопередачи. Источниками шумов могут быть усилительные и питающие устройства, а также звуконосители, на которых записываются звуковые сигналы. В случае фотографических и магнитных носителей шумы появляются вследствие неоднородной структуры их чувствительных слоев. Для снижения уровня этих шумов, часто не сокращая даже диапазона исходного сигнала, можно ограничить частотный диапазон системы со стороны низких частот частотами 100÷200 Гц, а со стороны высоких — частотами 12 000÷10 000 Гц.

Помимо этого, применяя ограничительные фильтры, не пропускающие частотные составляющие ниже 50÷150 Гц, можно устранить излишнюю и неприятную подчеркнутость низких частот при передаче речи, добиться лучшей ее разборчивости. Такие же фильтры позволяют сгладить различия в звучании голоса одного и того же исполнителя, записанного в неодинаковых условиях или в разное время. Изменение частоты среза со стороны низких частот можно использовать как средство для усиления драматической выразительности голоса, а со стороны высоких частот — для смягчения подчеркнутости шипящих и свистящих звуков речи.

Использование ограничивающих фильтров рекомендуется в ряде случаев при передаче музыкальных программ. Как отмечает французский звукорежиссер Ж. Бернар [2], «бывает трудно получить хорошую четкость низких частот при записи звучания контрабаса». Для устранения этого недостатка его английский коллега Е. Элкин предлагает понижать уровень или срезать основной тон этого инструмента, так как он «менее важен, чем его гармоники» [38]. Таким образом, срезание низких частот в области нахождения первых основных тонов контрабаса, т. е. до 50÷70 Гц (см. параграф 2.3), дает положительный результат. Подобная же рекомендация о срезании основного тона имеется и в отношении звучания скрипки [24].

Ограничение частотного диапазона передачи позволяет создавать ряд звуковых эффектов. Так, с помощью ограничительных фильтров можно имитировать телефонные разговоры, для чего час-

тотный диапазон передачи приближают к диапазону телефонных каналов (300÷3000 Гц). Выбор ограничительных фильтров должен осуществляться с учетом высоты голоса исполнителя и содержания разговора. Для женского голоса частоту срезания в области низких частот следует выбирать выше, чем для мужского. С помощью набора ограничительных фильтров, показанного на рис. 7.10, можно создать эффект телефонного разговора, а также имитировать звуки радиоприемника, уличного громкоговорителя, аппарата диспетчерской связи и т. д.

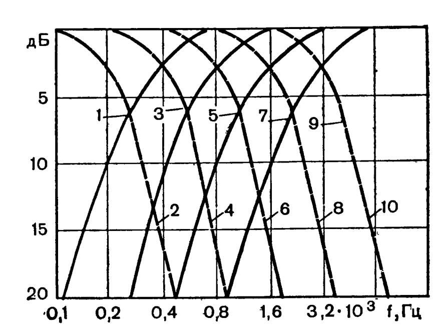


Рис. 7.10. Кривые затухания фильтров, используемых для ограничения диапазона передачи со стороны низких (*1, 3, 5, 7*) и высоких (*2, 4, 6, 8*) частот

Итак, оказывается, что:

1) при передаче ряда звуковых сигналов нет необходимости в полном использовании частотного диапазона звукопередающих систем;

2) его ограничение уменьшает шумы системы, повышает четкость передаваемых сигналов, создает некоторые звуковые эффекты;

3) ограничение следует выполнять, ориентируясь на частотный диапазон передаваемого звучания (см. главу 2) с контролем на слух.

7.6. Управление формой частотной характеристики на ее краях

Несмотря на то, что прямолинейная частотная характеристика электроакустической системы представляется идеальной для передачи любых звучаний, изменение ее формы в ряде случаев оказывается полезным. Такое изменение в виде подъемов или спадов характеристики можно использовать, например, для того, чтобы оттенить наиболее характерные особенности отдельных звучаний. Одни из этих особенностей требуют изменения частотной характеристики на концах, другие — в ее центральной части. Управление частотной характеристикой на ее краях достигается с помощью высоко- и низкочастотных фильтров, а в средней части — с помощью полосовых фильтров. Очевидно, что для полного управления формой характеристики нужно иметь возможность изменять высоту подъемов и глубину спадов так, как это показано на рис. 7.11 для фильтров, регулирующих частотную характеристику в области низких и высоких частот.

Известно, что изменение уровня сигнала в процессе звукопередачи приводит к заметному изменению его спектрального состава (см. параграф 5.1). В условиях кинопоказа этот уровень значительно превышает нормальный, при просмотре же телепрограмм — чаще бывает ниже его. В результате прослушивания в первом случае замечается сильное подчеркивание низких и слабое — высоких частот,

а во втором происходит соответствующее их ослабление. Указанное изменение спектрального состава воспринимаемого звучания особенно заметно на речевом сигнале. Имея это в виду, в процессе передачи предусмотрительно корректируют частотную характеристи-

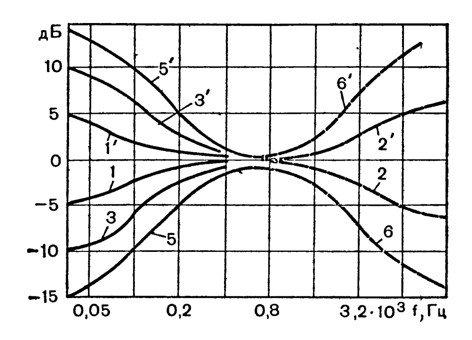


Рис. 7.11. Кривые изменения крутизны спада и подъема частотной характеристики передачи на низких (*1*, *1′*, *3*, *3′*, *5*, *5′*) и высоких (*2*, *2′*, *6*, *6′*) частотах

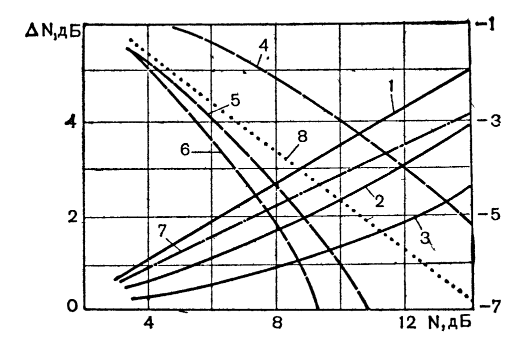


Рис. 7.12. Повышение и понижение уровня ΔN женской (*1*—*6*) и мужской (*7*, *8*) речи в различных полосах спектра при усилении голоса на N дБ

ку системы, пользуясь фильтрами, изменяющими ее на краях. Поэтому такие фильтры часто называют *речевыми*.

Другой причиной, заставляющей пользоваться речевыми фильтрами, является несоответствие уровня громкости речи, выбранного исполнителем, характеру передаваемой сцены. Если исполнитель сообразно характеру сцены должен говорить тише нормального, а микрофон стоит далеко, то он невольно усиливает голос. Когда же ему нужно говорить очень громко, например выступая в роли оратора, а микрофон стоит в пустом помещении, уровень громкости непроизвольно снижается. Иногда исполнитель старается не усиливать голос, ссылаясь на характерную его выразительность именно при выбранном им уровне громкости.

Как видно из графиков на рис. 2.3, усиление голоса (N дБ) приводит к увеличению роли средних частот по сравнению с высокими и особенно с низкими частотами. Судя же по рис. 7.12, на котором даны кривые изменения уровня ΔN в различных полосах его спектра при усилении голоса, наибольший рост уровня громкости женской речи наблюдается в полосе 980÷3550 Гц (кривая *1*), наименьший — в полосе 5400 — 10 000 Гц (кривая *3*), причем этот рост сопровождается быстрым падением уровня в полосах 100÷500, 500÷700 и 700÷980 Гц (кривые *4, 5, 6*). То же наблюдается и при усилении мужского голоса (кривые *7, 8*). На рис. 7.12 шкала для нарастающих уровней ΔN дана слева и для убывающих — справа.

Пользуясь графиками рис. 7.12 и зная, насколько изменился уровень речи по сравнению с необходимым, можно исправить ошибку, допущенную исполнителем. При недостаточной громкости речи нужно снизить, а при излишне повышенной — поднять частотную характеристику системы на краях, что выполняется с помощью речевых фильтров.

Фильтры, осуществляющие коррекцию на высоких частотах, необходимо использовать для подавления выделяющихся взрывных, шипящих и свистящих звуков в том случае, когда нужно передать очень тихую речь или шепот. Это оправдывается тем, что при такой тихой речи уровень согласных, и особенно взрывных и шипящих, по сравнению с гласными заметно возрастает. И если в этом случае нужно было снижать частотную характеристику системы, то при записи речи исполнителей, имеющих плохую дикцию (репортаж, хроникальные передачи), для повышения ее разборчивости нужно, наоборот, повышать характеристику в области высоких частот.

Спад характеристики со стороны низких частот требуется осуществлять при ведении передачи из акустически несовершенных помещений. Характерное для таких помещений относительно большое время реверберации на низких частотах воспринимается на слух неприятно и делает речь менее разборчивой.

Фильтры, управляющие частотной характеристикой системы в области низких и высоких частот, могут использоваться для создания эффекта удаления или приближения исполнителя. Как следует из параграфа 4.4, удаление источника сложного сигнала сопровождается ослаблением главным образом высокочастотных составляющих. Это происходит потому, что при значительном увеличении расстояния от микрофона до источника потери энергии в воздухе возрастают вместе с частотой. Помимо этого, для удаляющегося источника характерно уменьшение общего уровня громкости. Следовательно, создания эффекта перемещения источника по глубине нужно добиваться путем изменения уровня сигнала одновременно с использованием фильтров, работающих на краях частотного диапазона.

Интересно отметить, что эффект удаления можно получить при использовании некоторых одиночных источников звука. Так, композитор Берлиоз пишет, что в звучании английского рожка «слы-

шится что-то удаленное». Это обстоятельство было использовано в фильме «Большой вальс» (режиссер *Ж. Дювивье*) в сцене, где отдаленное звучание пастушеского рожка подсказало Иоганну Штраусу мелодию нового вальса. Можно предположить, что это впечатление удаленности связано с той же причиной, благодаря которой несильный женский голос воспринимается хорошо издалека (см. параграф 2.2). Названный инструмент, как и тренированный женский голос, имеет форманты в пределах частот 2200 и 3200 Гц, т. е. в зоне наибольшей чувствительности слуха.

В современной популярной музыке, устанавливая микрофоны вблизи источников звука, стремятся создать эффект приближения этих источников к слушателям и большей интимности звучания. Это делается как в отношении музыкальных инструментов, так и в отношении певцов, при этом часто намеренно подчеркиваются какие-то особенности голоса каждого из исполнителей. Такая искусственная «характерность» голоса достигается главным образом с помощью фильтров, работающих в низко- и высокочастотных областях диапазона.

Наконец, фильтры низких частот используются для коррекции характеристики микрофонов — приемников градиента давления (эффекта ближней зоны). Такая коррекция осуществляется или фильтрами, встроенными непосредственно в микрофон (см. параграф 6.5), или обычными речевыми фильтрами, находящимися на звукорежиссерском пульте.

7.7. Управление частотной характеристикой в ее центральной области

Анализ спектральных характеристик звучания натуральных источников (см. главу 2) и особенностей слухового восприятия (см. параграф 4.2) показывает, что форма частотной характеристики системы на ее центральном участке имеет для высококачественной звукопередачи особую важность. В этой области находится значительная часть формант речевых и музыкальных сигналов, определяющих их характер. К ней относится максимальная заметность выбросов и провалов, появляющихся на частотной характеристике передачи (см. параграф 5.5).

Важность этого участка характеристики еще больше увеличивается при возможных совпадениях формантных областей, характерных для звуковых источников, с провалами на частотной характеристике системы передачи, при которых эта характерность может исчезнуть. Такое же совпадение формант с подъемами характеристики очень искажает тембр звучания. В этом случае, например, «звук скрипки становится назойливым, резким, отрывистым и плоским» [2].

Казалось бы, что правильнее всего иметь частотную характеристику передачи на средних частотах возможно близкой к равномерной, но это не так. Ведь при умелом подчеркивании формантных областей отдельных инструментов и певческих голосов можно их зву-

чания несколько приблизить к звучаниям лучших образцов таких источников звука. Для этого используются фильтры, создающие пики на характеристики вблизи частот 2, 3, 5 и 8 кГц с регулированием в пределах $10 \div 12$ дБ. Частоты, на которые настраивают фильтры, выбираются так, чтобы они попадали в области формантных выбросов возможно большего числа голосов и инструментов.

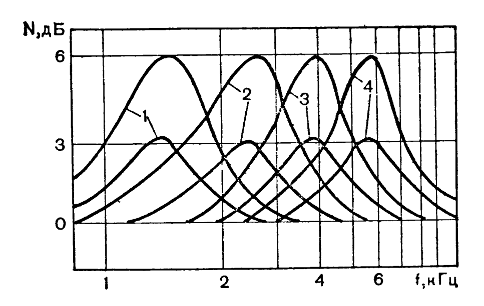


Рис. 7.13. Подъемы характеристики на частотах 1,4 (*1*), 2,8 (*2*), 4,0 (*3*) и 5,6 кГц (*4*), содаваемые фильтрами «присутствия»

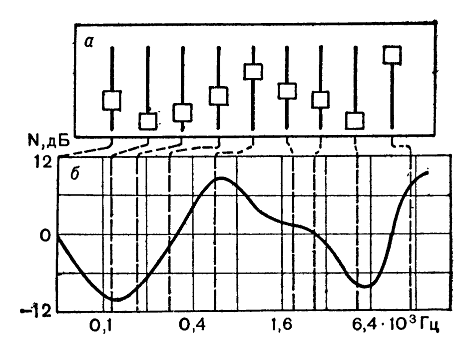


Рис. 7.14. Расположение ручек управления октавными фильтрами (*а*) и получаемая при этом частотная характеристика передачи (*б*)

Отсутствие среди них фильтров, подчеркивающих низкочастотные форманты, связано, вероятно, с тем, что их использование часто не дает желаемых результатов [2].

Опыт показывает, что некоторое подчеркивание тех частотных составляющих сигнала, которые находятся в пределах максимальной чувствительности слуха, повышает качество звучания, делает его более четким, ярким и красочным. При таком подчеркивании у слушателя создается впечатление приближения к исполнителям, называемое *эффектом присутствия*. Для управления этим эффектом пульты звукорежиссера имеют фильтры, создающие пики до $6 \div 8$ дБ, обычно, как это показано на рис. 7.13, на частотах 1,4; 2,8; 4,0 и 5,6 кГц.

Часто у звукорежиссеров возникает необходимость в переформировании частотной характеристики в ее средней части и по другим причинам. Такая необходимость появляется, например, тогда, когда нужно восстановить частотную характеристику петличного микрофона, работающего не в оптимальных условиях (скрытого под одеждой исполнителя). В этом случае нужно внести частотную коррекцию в области 2÷3 кГц.

Возможность изменения формы характеристики используется при передачах популярной музыки и для усиления драматического эффекта в художественных фильмах. Ведь художественная ценность звукопередачи определяется в ряде случаев не ее полной натуральностью, а психологическим обострением восприятия, создаваемым ею совместно с изображением, видимым на экране и придающим последнему особый смысл. Так, например, в японском фильме «Расёмон» (режиссер *Акира Куросава*) жрица начинает говорить голосом убитого самурая, что создает исключительно впечатляющий мистический эффект.

Для управления частотной характеристикой в средней зоне используются фильтры, позволяющие изменять ее форму в октавных интервалах. По рекомендациям ГОСТ 12090-66 центральные частоты фильтров должны быть равными 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120, 10240 Гц. Выбросы и провалы на этих частотах могут изменяться ступенями в 3÷4 дБ в пределах ±15 дБ. На рис. 7.14, *а* показано положение движков управления фильтрами, при котором форма частотной характеристики имеет вид, изображенный на рис. 7.14, *б*.

Рассмотрение случаев обоснованного управления формой частотной характеристики приводит к ряду общих рекомендаций.

1. Фильтр, создающий спад характеристики в сторону низких частот, следует использовать для улучшения четкости речи при передачах из акустически несовершенных помещений или при размещении исполнителя вблизи микрофона — приемника градиента давления.

2. Спада частотной характеристики в сторону низких с одновременным менее заметным спадом в сторону высоких частот следует добиваться при повышенном уровне звукопередачи или при уменьшенном против необходимого уровня громкости речи исполнителя.

3. Подъемом характеристики на краях — бóльшим на низких и меньшим на высоких частотах — можно достигнуть повышения качества передачи в случае, когда сигналы воспроизводятся на пониженном уровне.

4. Интимность звучания и искусственная характерность голоса исполнителя в передачах современной популярной музыки достигается также при подъеме частотной характеристики на ее краях.

5. Спад на краях характеристики — больший в сторону высоких частот — смягчает взрывные, свистящие и шипящие звуки в случае передачи очень тихой речи или шепота. Такой же спад с одновременным уменьшением уровня сигнала создает эффект удаления источника звука.

6. Подъем характеристики со стороны высоких частот рекомендуется для повышения четкости речи исполнителя, имеющего плохую дикцию.

7. Пики в средней зоне частотной характеристики помогают выделить формантные области, подчеркнуть характерность голоса или инструмента, создать эффект присутствия.

8. К изменению формы характеристики с помощью фильтров, образующих пики и провалы, прибегают для ее выравнивания, для создания характерных звучаний популярной музыки или новых звучаний художественного плана.

9. Выбор высоты подъема или глубины спада частотной характеристики можно осуществлять, ориентируясь на кривые равной громкости (см. рис. 4.1), на кривые рис. 7.13 или по слуху.

Глава 8.

ВЫБОР ПОМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ЗВУКОПЕРЕДАЧИ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО АКУСТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

8.1. Факторы, определяющие акустические условия передач

Помещение, как элемент звукопередающей системы, заметно влияет на исходный звуковой сигнал. Запаздывающие отражения, создающие реверберационный процесс, вносят в него временны́е изменения. Увеличение времени запаздывания первых отражений изменяет его так, что слух может судить о размерах помещения и пространственном размещении источника. Неравномерность спектра собственных частот и частотное различие в звукопоглощении для отдельных поверхностей помещения, изменяя частотный состав отраженных сигналов, влияет на тембр звучания. Интерференционные явления и плохое рассеяние отраженной энергии приводят к пространственной неравномерности воспринимаемого в помещении сигнала. Способность же слуха суммировать звуковую энергию в течение 50 мс усиливает сигнал и подчеркивает неравномерность тем больше, чем больше доля отраженной энергии. Следовательно, помещение вносит в передачу свои, правда, не совсем обычные искажения.

Указанные искажения, будучи связанными с акустическими параметрами помещения, по-разному влияют на качество звучания. Отсюда появляется необходимость в управлении этими параметрами в процессе звукопередачи, что делается, исходя из вида (речь, музыка, шумы) или характера (семантического, эстетического) информации, из акустических данных того пространства, в котором действуют исполнители.

Прежде всего управление должно осуществляться в отношении следующих акустических параметров помещения: а) времени реверберации, которое влияет на четкость звучания и акустический баланс, создает впечатление о видимом на экране помещении и относительном размещении источников звука по глубине; б) частотной характеристики этого времени, от которой зависит тембр исходного сигнала; в) временно́й структуры ранних отражений, оказывающей большое влияние на четкость и прозрачность звучания, на представление о размерах помещения, из которого ведется передача. Что же касается равномерности звукового поля, то нужно добиваться, чтобы она обеспечивалась не в процессе управления сигналами, а при проектировании помещений.

Зная, как акустические параметры помещения влияют на характер сигнала, можно достаточно точно определить конкретные значения управляемых величин. Так, при переходе от показа на экране открытого пространства к показу большого помещения время ревер-

берации нужно изменять в пределах от 0 до $5 \div 8$ с. Для изменения тембральной окраски звучания следует поднять или опустить частотную характеристику реверберации в соответствующей области на $3 \div 10$ дБ и т. д.

Однако есть обстоятельства, чаще эстетического плана, когда пределы, в которых следует управлять акустическими параметрами помещения, не могут быть определены количественно. Это происходит потому, что еще не установлены однозначные связи между различными эмоциональными оттенками субъективно воспринимаемого звучания и объективными параметрами сигналов. Вот почему получение этих оттенков связывается обычно с хорошим вкусом и мастерством звукорежиссеров.

8.2. Связь субъективного восприятия звучания с объективными акустическими параметрами помещения

В исследованиях Л. Беранека указывается на ряд таких оттенков звучания, которые благоприятно воспринимаются слухом и субъективно повышают качество звучания. В их числе следует выделить наиболее важные.

Полнота звука. Она характеризует насыщенность и округлость звучания и зависит от отношения энергии реверберирующего звука к сумме энергий прямого и его первых отражений, то есть представляется отношением, обратным фактору реверберационных помех:

$$Q = \frac{E_{\text{пр}} + E_{\text{отр}\,(t \leqslant 50)}}{E_{\text{отр}\,(t > 50)}}. \qquad (8.1)$$

Известно [15], что фактор реверберационных помех зависит от времени реверберации T и акустического отношения, определяемого плотностями отраженной и прямой энергий:

$$R = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пр}}}. \qquad (8.2)$$

Величина же отраженной энергии, принимаемой слитно с прямой и представленной в выражении (8.1) в виде $E_{\text{отр}(t<50)}$, зависит от акустической обработки поверхностей помещения, близко расположенных к источнику. Следовательно, полнота звука определяется значениями T и R, а также размерами, формой помещения и обработкой его околосценического пространства.

Бо́льшая полнота звука рекомендуется для старинной музыки ($T > 2$ с и $R > 3$), средняя — для симфонической ($T < 2$ с и $R \approx 1$) и меньшая — для эстрадной музыки.

Четкость звучания. Четкость речевых передач обусловливается исполнительскими данными говорящего и, кроме того, однозначно определяется временем реверберации T и уровнем громкости речи. Для музыки под четкостью понимают отчетливое восприятие отдельных тонов в мелодии (горизонтальная четкость) и одновременно

звучащих тонов, создаваемых различными инструментами или их группами (вертикальная четкость). *Горизонтальная* четкость возрастает при уменьшении времени реверберации и акустического отношения. *Вертикальная* — зависит от мощности отдельных музыкальных инструментов в оркестре и определяется относительным размещением исполнителей и их мастерством. Важную роль в создании нужной четкости играет размещение микрофонов относительно исполнителей.

Эффект присутствия. Этот эффект связан с представлением о размерах помещения и об удаленности источника звука. Впечатление большей близости к источнику, интимности, камерности звучания создается при малой полноте звука и малом времени прихода к слушателю первых отражений (при $\Delta t < 20$ мс). При увеличении того и другого из параметров у слушателей создается впечатление о нахождении в зале все большего объема, что в итоге определяет тот акустический баланс, который обеспечивает оптимальные условия восприятия музыки.

«Теплота» звука ассоциируется с большей звучностью низкочастотных составляющих сложного сигнала. Такого изменения соотношения составляющих сигнала можно достигнуть путем подъема частотной характеристики времени реверберации в области низких частот.

Музыкальный баланс. Строгое, художественно оправданное равновесие звучания всех групп оркестра, солистов и оркестра, определяющее собой понятие баланса, в хороших оркестрах обеспечивается самими исполнителями. Однако этот внутренний баланс, создаваемый в концертном зале, легко нарушается при звукопередаче с помощью электроакустической системы. Причиной этого может быть недостаточная диффузность звукового поля в помещении, неудачное размещение микрофонов и исполнителей или неточный выбор уровней усиления в каналах передачи. Следовательно, создание необходимого музыкального баланса требует помещения с равномерным звуковым полем и оптимальным временем реверберации, а также правильного размещения исполнителей относительно друг друга и микрофонов.

Ансамбль. Ритмическая точность исполнения, называемая ансамблем, кроме мастерства дирижера и исполнителей требует еще и того, чтобы исполнители хорошо слышали друг друга. Такая слышимость зависит от размещения исполнителей, от объема и времени реверберации помещения, акустического отношения и запаздывания первых отражений, связанных с конструкцией и обработкой околосценического пространства.

Яркость звучания. Впечатление о яркости звучания создается при некотором подчеркивании высокочастотных составляющих сложного сигнала. Такое подчеркивание можно осуществить акустическими средствами, например поднимая частотную характеристику времени реверберации в области высоких частот.

При субъективной оценке качества звучания музыканты и звукорежиссеры различают множество оттенков. Говорят, что звучание

ясное, сочное, мрачное, нежное и т. д. Большое число таких оттенков, отсутствие однозначной связи между ними и объективными параметрами звучания затрудняют принятие мер по повышению качества звукопередачи. Вот почему в одной из работ была сделана попытка связать субъективные оценки качества с формой частотной характеристики передачи. Было установлено, что «полнота» и «объемность» звучания связаны с отдачей в области частот 30÷200 Гц, «мягкость» и «закругленность» — с отдачей в области 300÷600 Гц, «четкость» и «звонкость» — соответственно с отдачей в областях 1800÷4000 Гц и 4000÷7000 Гц.

Рассмотренные закономерности показывают, что большое число субъективно складывающихся нюансов, определяющих качество звучания, связано то с одним, то сразу с несколькими объективными акустическими параметрами помещения. Следовательно, для того, чтобы эти параметры всегда были бы оптимальными, ими нужно управлять. Можно указать на два способа управления акустическими условиями в помещениях для высококачественных передач. Первый из них предполагает наличие нескольких специализированных ателье с оптимальными акустическими условиями для основных видов программ (речевых и музыкальных), которые можно изменять в некоторых пределах. Если же в ателье возможности управления окажутся недостаточными, их расширяют на одном из последующих этапов обработки сигналов. Второй путь — использование универсального ателье, в котором наличие переменного заглушения позволяет управлять акустическими условиями в пределах, достаточных для создания высокого качества звучания при любом виде передачи.

В первом случае в условиях кинематографа для записи речи используют дикторские ателье, ателье для озвучения и дубляжа, павильоны синхронной съемки. Им в условиях телевидения в известной мере соответствуют малые речевые, средние литературно-драматические и большие студии. Для записи и передачи музыки используются музыкальные ателье или студии, рассчитанные на малое (10÷12), среднее (45÷60) и большое (100 и более) число исполнителей.

8.3. Выбор ателье для речевых передач

Дикторское ателье. Объем дикторского ателье, рассчитанного на 1—2 исполнителей, выбирается не меньшим, чем 50÷70 м^3. Это делается потому, что при уменьшении объема плотность спектра собственных частот уменьшается, характеристика реверберации, особенно на низких частотах, становится все более неравномерной и качество звучания ухудшается. Учитывая, что дикторская передача является образцовым примером передачи семантической информации, важнейшее значение для нее приобретает высокая разборчивость речи. В этом случае время реверберации в ателье должно быть небольшим, порядка 0,4÷0,6 с, и мало зависящим от объема помещения.

Опыты показали, что правильная передача тембра голоса исполнителя обеспечивается при равномерной частотной характеристике времени реверберации или при некотором ее снижении (на 10÷÷15%) в области низких частот. Высокая диффузность звукового поля в ателье обеспечивается распределением звукопоглощающих материалов. Структура же ранних отражений не имеет значения, так

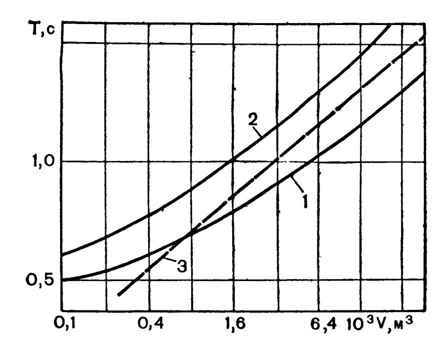


Рис. 8.1. Зависимость времени реверберации от объема ателье для дикторской речи (*1*), озвучения (*2*) и для телестудий (*3*)

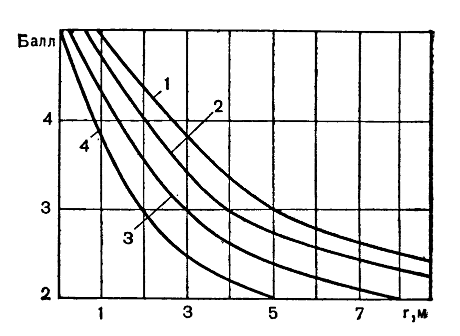


Рис. 8.2. Зависимость качества речевых передач от расстояния источник — приемник звука при *T*, равном 1,2 с (*1*); 1,8 с (*2*); 2,5 с (*3*) и 4 с (*4*)

как дикторская речь не должна связываться слушателями с представлением об акустике какого-то помещения. Как следует из характеристики дикторских передач, акустические условия в ателье, из которых они ведутся, должны быть оптимальными и не нуждаться в управлении.

Ателье речевого озвучения. В таких ателье производят запись речи под заранее снятое изображение. Этим предопределяется тесная связь звука и изображения, и речь должна донести до слушателя не только семантическую, но и эстетическую информацию. В этом случае при важной роли разборчивости большое значение приобретает передача тембральных особенностей речи различных исполнителей. Появляется необходимость показать, в каком пространстве происходят их действия, как они размещены относительно друг друга и какой масштаб изображения. Все это требует, чтобы ателье речевого озвучения имело переменные акустические условия, которые поддавались бы управлению в возможно более широких пределах.

Опыт показывает, что для таких ателье время реверберации следует выбирать на 10÷50% бо́льшим, чем для дикторского (рис. 8.1). Ателье озвучения, в котором одновременно работает до 10—25 исполнителей, имеет по сравнению с дикторским значительно больший объем, достигающий 300÷800 м^3. Литературно-драматические студии, используемые для радиопередач, в соответствии с рекомендациями ОИРТ имеют объемы и время реверберации, близкие к тем, которые приняты для ателье речевого озвучения. Так, для средней такой студии рекомендуется объем $V = 250 \div 500$ м^3 с временем

реверберации $T = 0{,}6 \pm 0{,}1$ с, для большой — $V = 800 \div 1000$ м^3 и время $T = 0{,}8 \pm 0{,}1$ с.

Относительно большие объемы ателье озвучения и некоторое увеличение оптимума времени реверберации приводят к тому, что время реверберации в них по сравнению с дикторскими ателье возрастает почти в два раза. Это, как будет показано, расширяет возможности управления названным акустическим параметром и способствует подчеркиванию тембральных особенностей голоса исполнителя. При указанных объемах ширина и высота ателье достаточно велики для того, чтобы время запаздывания трех начальных отражений относительно прямого сигнала были бы оптимальными для речи и соответственно равными $10 \div 15$, $15 \div 25$, $25 \div 35$ мс.

Таким образом, речевые ателье и студии характеризуются достаточно большим временем реверберации, порядка $0{,}8 \div 1{,}5$ с, что позволяет осуществлять управление им. Как это видно из кривых *1* и *2* (рис. 8.2), высокая разборчивость, соответствующая баллу 4 ($A = 75\%$) и выше, получается в студиях при расстояниях от источника до микрофона, изменяющихся в пределах $0{,}5 \div 3{,}0$ м. Это указывает на то, что при речевом озвучении можно управлять звуковыми планами. Все это вместе с возможностью управления структурой ранних отражений позволяет улучшить как семантическую, так и эстетическую информацию и тем самым повысить художественные достоинства звукопередачи.

Павильон синхронной съемки. В нем запись звука производят одновременно с киносъемкой изображения. Однако такой синхронный метод не нашел применения при записи музыкальных звучаний прежде всего потому, что музыка, особенно оркестровая, редко предлагается зрителям одновременно с показом на экране музыкантов-исполнителей. Кроме того, такая запись невысока по качеству и экономически очень невыгодна.

Другое дело — запись речи. Когда выражение лица, жесты, движения исполнителя увязываются с его речью в процессе игры, создаваемый звукозрительный образ становится наиболее естественным и жизненно правдивым. Этому способствует и правдивая информация об акустических условиях, в которых действует исполнитель.

Так как запись художественной речи в павильоне выполняется в декорациях, изображающих то маленькие заглушенные помещения, то очень большие гулкие залы, время реверберации при записи должно изменяться в соответствии с характером изображаемого пространства. При натурных декорациях оно должно быть равным нулю, при декорациях, изображающих паровозное депо или большой цех,— нескольким секундам. Таких изменений времени реверберации в павильоне получить нельзя, а потому в нем создают оптимальное для речи время реверберации, а необходимого его изменения добиваются искусственным путем в процессе записи или перезаписи звука.

О численном значении оптимального времени реверберации для синхронной записи или передачи речи можно судить по графику рис. 8.3, на котором значками отмечено время реверберации реаль-

ных студий, а линиями выделены те из них, которые субъективно оцениваются как наилучшие. Судя по графику, несмотря на очень большие объемы таких помещений, время реверберации в них должно быть равным 0,7÷1,0 с.

При малом времени реверберации, характерном для павильонов и телестудий, интенсивность первых отражений очень понижается и эффект, обусловленный их запаздыванием, не может заметно влиять на качество речевых передач. Вместе с тем такое время реверберации и равномерное размещение звукопоглотителей делают звуковое поле в этих помещениях близким к диффузному. Это имеет достаточно важное значение, так как процесс звукозаписи в этих помещениях связан с перемещениями источников и приемников звука.

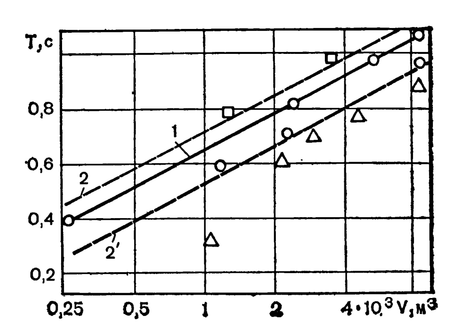


Рис. 8.3. Зависимость времени реверберации от объема телестудий по данным Би-Би-Си: *1* — оптимальное время; *2*, *2'* — допустимые отклонения, △ — излишне заглушенные студии, □ — недостаточно заглушенные студии.

Итак, павильоны синхронной съемки и телестудии имеют очень большие размеры и малое время реверберации, которое можно незначительно изменять за счет звукопоглощающего действия декораций. Частотная характеристика времени реверберации для этих помещений должна быть равномерной, возможен небольшой ее подъем на низких частотах. Размеры павильонов позволяют получить большое время запаздывания первых отражений, однако очень малая эффективность последних приводит к тому, что создать эффект пространственности с их помощью не удается. Пространственное впечатление, связывающее речь с изображением, снятым в павильоне, можно получить только искусственным путем в процессе записи или перезаписи звука.

Таким образом, приведенный анализ позволяет сделать правильный выбор ателье или студии для записи и передачи речи с учетом возможности изменения их акустических характеристик, что необходимо для более полной передачи семантической и эстетической информации.

8.4. Выбор ателье для музыкальных передач

В условиях кинематографии и телевидения музыка имеет различное назначение. Она может быть сопровождающей, связывающей или тематической, т. е. специально написанной для данной сцены. Но в любом из этих случаев она чаще всего звучит за кадром и должна быть связана с характером происходящего на экране действия, оставаясь независимой от внешней, видимой на нем обстановки. Эта внутренняя, чисто психологическая связь будет наилучшей при оптимальных условиях передачи музыкальных звучаний.

Музыка «в кадре» часто звучит одновременно с показом героев в концертном или театральном зале. И в этом случае оптимальные акустические условия передачи музыки вполне увязываются с изображением. Наконец, могут быть случаи, когда на экране изображен оркестр, играющий в акустически несовершенном помещении (цехе, крытом стадионе и т. д.). И вот здесь необходимость создания единого звукозрительного образа заставляет сделать отступление от оптимальных акустических условий для музыкальных передач. Однако отсюда нельзя делать вывод о том, что помещения, используемые для записи или передачи музыки, должны иметь стандартные акустические условия. Музыкальный оптимум далеко не стандартен и в большой степени зависит от характера музыкального произведения, типа ансамбля и особенностей музыкального жанра.

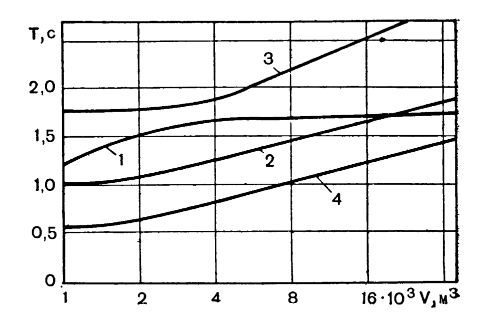


Рис. 8.4. Кривые $T=f(V)$ для передач симфонической музыки (*1*), камерной (*2*), старинной и органной (*3*), популярной (*4*) музыки

Как показали опыты В. Кюля по прослушиванию симфонической музыки в помещениях больших объемов (более 2000 м^3), для оптимального восприятия музыкальных произведений романтического («Четвертая симфония» Брамса), классического («Юпитер» Моцарта) и современного («Весна священная» Стравинского) стиля требуется, чтобы время реверберации в них было бы соответственно равным 2,07; 1,54 и 1,48 с. Кроме того, было замечено, что этот оптимум сохраняется для всех исследуемых помещений, несмотря на то, что они различались по объему в несколько раз. Это привело к выводу, что при передаче симфонической музыки время реверберации должно иметь среднее из указанных значений, равное 1,7 с, вне зависимости от объема помещения, если оно достаточно велико (кривая *1* на рис. 8.4). Что же касается малых помещений для передачи симфонической музыки камерного типа, то для них рекомендуется (кривая *2* на рис. 8.4) выбирать тем меньшее время реверберации, чем меньше по численности музыкальный ансамбль или объем помещения, используемого для звукопередачи.

При передаче хорового пения и особенно органной музыки, чтобы оттенить такие характерные особенности их звучания, как мелодичность, напевность, медлительность, стремятся увеличить время реверберации. Многие композиторы сочиняли свои произведения с расчетом на определенную акустику зала. Это относится к органной музыке И.-С. Баха, многим произведениям Берлиоза (например, «Реквием»), Вагнера («Парсифаль» и др.), Листа, наилучшим образом звучащим в соборах и залах с временем реверберации, большем 2 с. Если учесть сказанное, то выбор кривой Брюля в качестве исходной при определении оптимального времени реверберации для

старинной, органной и хоровой музыки (кривая *3* на рис. 8.4) представляется правильным.

В отличие от старинной эстрадная и особенно новая популярная музыка характеризуется быстрым темпом исполнения, большой ритмичностью и высокой камерностью или интимностью. Сохранению этих особенностей музыки способствует уменьшение времени реверберации в помещении и, как отмечалось выше, приводит к стремлению возможно больше приблизить микрофон к исполнителю. Кроме этого, если для старинной, классической и современной симфонической музыки важным является единство акустической обстановки, ее естественность, то для джазовой и популярной музыки характерны разноплановость и непостоянство акустических условий даже в пределах одного и того же музыкального произведения. Так как изменяющиеся акустические условия, используемые для получения новых звуковых эффектов, проще получить искусственными методами, ателье для передачи джазовой музыки должно иметь постоянное и малое время реверберации, определяемое по кривой *4* на рис. 8.4.

Частотная характеристика времени реверберации для джазовой и популярной музыки должна быть равномерной. Для музыки симфонической желателен подъем ее на 10÷20% в области низких частот. Для старинной музыки этот подъем может быть до 40%, что связано с предпочтением более подчеркнутой передачи звуков низкого регистра.

Для музыкальных ателье с большим временем реверберации важное значение имеет структура ранних отражений, которая создает впечатление о размерах зала, чувство естественности и прозрачности звучания, характерное для непосредственного слушания. Отражения, смешиваясь с прямым звуком, усиливают его и обогащают тембр звучания. Как показали опыты, оптимальная для музыкальных передач структура определяется запаздыванием трех первых отражений относительно прямого звука на время, соответственно равное 20÷30, 35÷50 и 45÷70 мс.

Как следует из приведенного анализа, музыкальные передачи требуют большого разнообразия акустических условий в помещении. Это требование связано как с рассмотренными ранее особенностями музыкальных ансамблей и исполняемых ими произведений, так и с объемом ателье, а следовательно, и с численностью исполнителей. Качество звучания зависит от его уровня громкости, который падает при увеличении объема помещения и возрастает при увеличении числа исполнителей *N*. Кроме того, при передаче звучания большого музыкального ан-

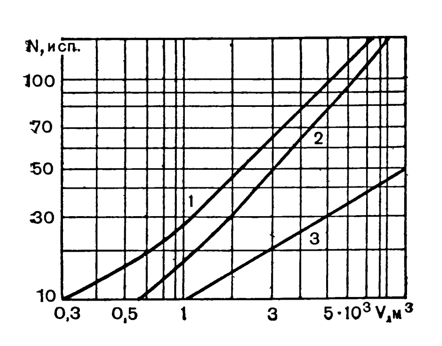


Рис. 8.5. Зависимости объема помещения от числа исполнителей, рекомендованные для кино-, радиостудий и концертных залов

самбля необходимо иметь значительное пространство для размещения исполнителей и микрофонов. Все эти зависимости нашли выражение в рекомендациях, представленных на рис. 8.5. На нем кривые *1* и *2* выражают зависимости количества исполнителей от объема, принятые для киноателье и радиостудий, а кривая *3* отвечает нормам, принятым для концертных залов. Учет особенностей музыкальных передач приводит к необходимости иметь на кино- и телестудиях ателье для камерной, джазовой, симфонической музыки, для симфонического оркестра с хором соответственно на 10÷12, 20÷25, 45÷60 и 100÷250 исполнителей с объемами 600÷800, 1500÷2000, 3000÷4000 и 9000÷12000 м^3.

В этих студиях должно быть оптимальное для их объема время реверберации (см. рис. 8.4). В них для управления структурой ранних отражений сверху и с боков оркестра на расстоянии около 9 м от его центра должны размещаться отражающие козырьки, ширина которых не менее 6 м, а угол наклона таков, что первые отражения приходят с оптимальным запаздыванием в зону размещения микрофонов.

8.5. Методы управления акустическими условиями в помещении

Управление сигналами необходимо не только для устранения искажений, вносимых системой, но и для такого изменения исходных звучаний, при котором точнее передается обстановка и характер событий, настроение героев, создается целостный звукозрительный образ.

Следовательно, управление сигналами имеет двойственный характер. В поисках оптимального звукового решения каждой сцены звукорежиссер может или исправлять, или «искажать» исходные сигналы. Важно только, чтобы то или иное из этих действий создавало такую композицию, при которой оптимальным образом сочеталась бы передача семантической и эстетической информации. Так как указанные виды информации предъявляют к сигналу часто противоречивые требования, то при управлении сигналами неизбежно возникает компромисс.

Даже тогда, когда звукорежиссер осуществил выбор помещения с оптимальными для данного звучания акустическими условиями, поиск указанного компромисса заставляет его прибегать к управлению этими условиями и искать для этого наиболее эффективный метод.

Самым важным параметром, характеризующим акустику помещения и требующим управления, является время реверберации, которое будет восприниматься микрофоном в процессе звукопередачи. Это время реверберации, называемое *эквивалентным*, представляется в виде:

$$T_{\text{экв}} = \frac{1{,}2T}{1{,}2 + T \lg \frac{1+R}{R}}, \qquad (8.3)$$

где T — время стандартной реверберации, характеризующее помещение в целом и определяемое по известной формуле:

$$T = \frac{0,164V}{-S \ln (1-\alpha)}, \qquad (8.4)$$

где V и S — объем и площадь всех внутренних поверхностей помещения; α — средний коэффициент звукопоглощения.

Как видно из равенств (8.2) — (8.4), эквивалентная реверберация может быть изменена путем изменения α и плотностей отраженной $E_{\text{отр}}$ и прямой $E_{\text{пр}}$ энергий, воздействующих на микрофон. Следовательно, возможность управления естественной реверберацией определяется пределами изменений трех указанных параметров.

Нетрудно заметить, что изменение плотности прямой энергии в точке размещения микрофона связано с изменением расстояния от него до источника звука. Отраженная же энергия, принятая им, зависит от направленных свойств микрофона. Очевидно, обострение характеристики направленности микрофона будет приводить к уменьшению воздействующей на него отраженной энергии. Величина этой энергии будет изменяться и при изменении среднего коэффициента звукопоглощения материалов, которыми обработаны внутренние поверхности помещения, выбранного для звукопередачи.

Таким образом, есть три способа управления естественной реверберацией: путем изменения расстояния между исполнителем и микрофоном, путем применения микрофонов с переменными характеристиками направленности и путем изменения общего звукопоглощения ателье или студии.

8.6. Управление временем реверберации путем изменения расстояния между исполнителем и микрофоном

Раскрывая зависимость между акустическим отношением, входящим в равенство (8.3), параметрами помещения и условиями, в которых проводится звукопередача, можно установить, как эти условия влияют на эквивалентное время реверберации. Для этого, как видно из выражения (8.2), нужно найти связь условий передачи с плотностью прямой и отраженной звуковой энергии, действующей на микрофон.

Если звукопередача ведется ненаправленным микрофоном, плотность прямой энергии в точке приема будет представляться в виде:

$$E_{\text{пр}} = \frac{J}{c_0}, \qquad (8.5)$$

где интенсивность звука J выражает собой акустическую мощность источника, воздействующую на единичную площадку. В случае шаровой волны, если эта площадка находится на расстоянии r от источника, интенсивность будет:

$$J = \frac{P_{\text{а}}}{4\pi r^2}, \qquad (8.6)$$

а плотность прямой энергии представится как

$$E_{\text{пр}} = \frac{J}{c_0} = \frac{P_{\text{а}}}{4\pi r^2 c_0}. \tag{8.7}$$

Плотность отраженной энергии, воздействующей на микрофон, будет равна произведению энергии, развиваемой в помещении при установившемся режиме, на коэффициент отражения β. Следовательно,

$$E_{\text{отр}} = E_0\beta = \frac{4P_{\text{а}}}{c_0\alpha S}(1-\alpha). \tag{8.8}$$

В этом случае акустическое отношение представится равенством:

$$R = \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пр}}} = \frac{16\pi r^2}{S} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha}. \tag{8.9}$$

Подставляя значение R в равенство (8.3), можно его переписать в виде:

$$T_{\text{экв}} = \frac{1{,}2T}{1{,}2 + T\lg\dfrac{1+R}{R}} = \frac{1{,}2T}{1{,}2 + T\lg\left[1 + \dfrac{\alpha S}{16\pi r^2(1-\alpha)}\right]}. \tag{8.10}$$

Полученная формула позволяет определить, как изменяется $T_{\text{экв}}$ при изменении расстояния r между исполнителем и микрофоном для конкретного помещения при различной его акустической обработке. Расчеты, выполненные для помещения с объемом $V=1500$ м^3 и площадью внутренних поверхностей $S=850$ м^2, были использованы для построения кривых на рис. 8.6, которые соответствуют случаям, когда средний коэффициент звукопоглощения α был равен 0,54; 0,27; 0,13; 0,07, а время реверберации равнялось 0,4; 0,95; 2,0 и 4,0 с (кривые *1*, *2*, *3*, *4*).

Как видно из рис. 8.6, изменение расстояния r приводит к тому, что эквивалентное время реверберации изменяется в широких пределах от полного до уменьшенного в 2÷5 раз значения времени реверберации данного помещения. Однако практическая возможность использования такого изменения для помещений с различной акустической обработкой далеко не одинакова.

Если помещение хорошо заглушено и его коэффициент звукопоглощения достаточно велик (см. кривую *1* на рис. 8.6), то $T_{\text{экв}}$ может быть изменено не больше чем в два раза. Но так как при таком заглушении помещения время реверберации в нем мало́, изменение $T_{\text{экв}}$ по своей абсолютной величине оказывается незначительным. Например, для кривой *1* уменьшение расстояния r с 8 до 0,2 м приводит к изменению $T_{\text{экв}}$ всего с 0,4 до 0,2 с.

Для помещений с большим временем реверберации T и соответственно малым α возможности управления эквивалентным временем реверберации по относительным и абсолютным его значениям заметно расширяются. Так, для обычных студий и ателье, время реверберации в которых колеблется от 0,9 до 2 с (на рис. 8.6 этот

интервал показан в виде заштрихованной полосы), эквивалентная реверберация может изменяться от названных значений T до $0{,}3 \div 0{,}5$ с, что существенно для данных помещений и позволяет использовать этот метод управления временем реверберации в условиях кино- и телестудий.

Этот метод управления особенно эффективен для помещений с очень большим временем реверберации. Как показывает кривая *4*

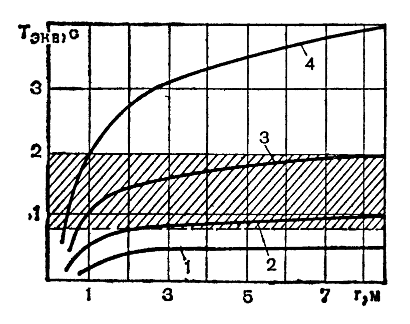


Рис. 8.6. Управление реверберацией путем изменения расстояния r между источником и приемником звука в помещениях с разным T

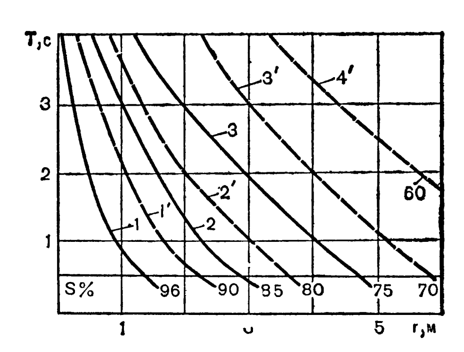


Рис. 8.7. Кривые для выбора расстояния между микрофоном и исполнителем при заданных времени реверберации и разборчивости речи ($S\%$)

(рис. 8.6), построенная для помещения с $T=4$ с ($\alpha=0{,}07$), время эквивалентной реверберации при предельно малом расстоянии $r=0{,}2$ м может быть уменьшено в 5—6 раз. Это позволяет повысить качество хроникальных передач, которые часто ведут из случайных, мало заглушенных помещений. Учитывая, что качество таких передач связано с разборчивостью речи, вопрос о выборе наилучшего расстояния может решаться с использованием кривых на рис. 8.7, определяющих связь между расстоянием r и временем реверберации T при определенных значениях слоговой разборчивости $S\%$. Кривые *1*, *2* и *3* ограничивают области, где слоговая разборчивость не ниже 96, 85 или 75%, а качество восприятия речевого звучания считается соответственно отличным, хорошим или удовлетворительным. Пользуясь кривыми, можно установить, при каких предельно допустимых расстояниях в помещениях с известным временем реверберации можно осуществить речевую звукопередачу с возможно высокой ее разборчивостью. Кривые *1'*, *2'*, *3'*, *4'* отвечают слоговой разборчивости соответственно равным 90, 80, 70 и 60%.

8.7. Управление временем реверберации с помощью микрофонов переменной направленности

Как следует из равенства (8.2), основой другого метода управления временем реверберации может быть изменение отраженной энергии $E_{\text{отр}}$, которая уменьшается вместе с обострением характе-

ристики направленности микрофона. Существование таких комбинированных микрофонов, как U67, 19А-19, 19А-23 и др., имеющих переменную характеристику направленности, позволяет использовать их для изменения акустического отношения R и, следовательно, как это видно из выражения (8.3), для влияния на эквивалентное время реверберации.

Если электрическая мощность, развиваемая на выходе ненаправленного микрофона до выключения источника звука, представляется в виде:

$$P_{э_1} = k(E_{пр} + E_{диф}), \qquad (8.11)$$

то на выходе направленного микрофона она будет иметь вид:

$$P_{э_2} = k\left(\varepsilon_0^2 E_{пр} + \varepsilon_{диф}^2 E_{диф}\right), \qquad (8.12)$$

где ε_0 и $\varepsilon_{диф}$ соответствуют чувствительности микрофона на акустической оси и в диффузном звуковом поле. После выключения источника звука эти мощности будут соответственно выражаться равенствами:

$$P'_{э_1} = kE_{диф} \qquad (8.13)$$

и

$$P'_{э_2} = k\varepsilon_{диф}^2 E_{диф}. \qquad (8.14)$$

Изменение уровня мощности при выключении сигнала в первом случае будет определяться равенствами (8.11) и (8.13), как:

$$10 \lg \frac{P_{э_1}}{P'_{э_1}} = 10 \lg \frac{E_{пр} + E_{диф}}{E_{диф}} = 10 \lg \left(\frac{1}{R} + 1\right) = 10 \lg \frac{1+R}{R}. \qquad (8.15)$$

Во втором случае это изменение с учетом равенств (8.12) и (8.14) будет выражаться так:

$$10 \lg \frac{P_{э_2}}{P'_{э_2}} = 10 \lg \frac{\varepsilon_0^2 E_{пр} + \varepsilon_{диф}^2 E_{диф}}{\varepsilon_{диф}^2 E_{диф}} =$$

$$= 10 \lg \left[\left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{диф}}\right)^2 \frac{1}{R} + 1\right] = 10 \lg \frac{\Omega + R}{R}. \qquad (8.16)$$

В последнем выражении (8.16)

$$\Omega = \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{диф}}\right)^2 \qquad (8.17)$$

представляет собой коэффициент направленности микрофона.

Подставляя в знаменатель выражения (8.4) вместо величины, определяемой равенством (8.15), другую, имеющую вид (8.16), можно написать выражение для $T_{экв}$, учитывающее направленные

свойства микрофона. Это выражение будет иметь вид

$$T_{\text{экв}} = \frac{1,2T}{1,2 + T \lg \frac{\Omega + R}{R}}. \qquad (8.18)$$

Известно, что для микрофонов с характеристиками направленности косинусоидального и кардиоидного типов коэффициент направленности $\Omega = 3$, для микрофонов с обостренной характеристикой типа супер- или гиперкардиоиды этот коэффициент равен 5 и, наконец, для остронаправленных микрофонов он увеличивается до 10 и 20 [8].

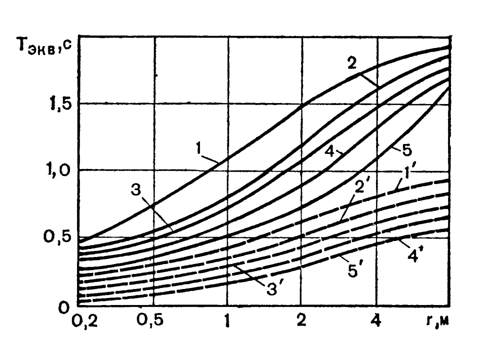


Рис. 8.8. Зависимость эквивалентной реверберации от расстояния при разных коэффициентах направленности и времени реверберации

Расчеты, выполненные нами по формуле (8.18) для студии с $V = 1500$ м³ и $S = 850$ м² при условии использования в ней микрофонов с различными характеристиками направленности, позволили построить кривые, приведенные на рис. 8.8. На нем кривые *1*, *2*, *3*, *4* и *5* соответствуют значениям $\Omega = 1$; 3; 4,5; 10 и 20 при времени реверберации студии $T = 2,0$ с и кривые *1′*, *2′*, *3′*, *4′* и *5′* — тем же значениям Ω при $T = 1,0$ с.

Как можно заметить при рассмотрении кривых каждой из групп, их относительное смещение происходит далеко не пропорционально значениям Ω. При одном и том же расстоянии между микрофоном и исполнителем изменение коэффициента направленности с 1 до 3 дает почти такое же уменьшение $T_{\text{экв}}$, как и последующее изменение этого коэффициента до 20. Влияние коэффициента направленности больше ощутимо в менее заглушенных помещениях. Так, при $T = 2$ с и расстоянии $r = 2$ м увеличение Ω с 1 до 20 приводит к уменьшению $T_{\text{экв}}$ на 0,7 с, тогда как при $T = 0,95$ с, том же расстоянии и таком же изменении Ω уменьшение $T_{\text{экв}}$ составляет только 0,3 с. При $T = 4$ с влияние Ω увеличивается еще более заметно — $T_{\text{экв}}$ уменьшается на 1,3 с.

Таким образом, очевидно, что использование данного метода для управления временем реверберации не всегда оправданно. В помещениях с малым временем реверберации, например в речевых ателье, его эффективность мала. Вместе с тем в помещениях с временем реверберации, близким к 2 с, например в музыкальных ателье, этим методом можно создать оптимальные условия при переходе от передачи одного типа ансамбля или вида музыкального произведения к другому, а также сохранить единство звукозрительного образа при изменении масштаба изображения.

Этот метод особенно результативен в помещениях с большим вре-

менем реверберации. В этом случае при неизменном расстоянии r между исполнителем и микрофоном обострение характеристики направленности приводит к двух- и трехкратному уменьшению эквивалентной реверберации. Если одновременно изменять r и Ω, то возможности управления временем реверберации значительно расширяются. Как видно из рис. 8.8, при стандартной реверберации порядка 2÷1,5 с пределы такого расширения вполне достаточны для практических целей.

8.8. Управление временем реверберации с помощью специального размещения звукопоглощающего материала

Эквивалентным временем реверберации можно управлять, размещая в направлении акустической оси микрофона эффективный материал с коэффициентом звукопоглощения α_1, заметно превышающим средний коэффициент звукопоглощения α_2 всего помещения.

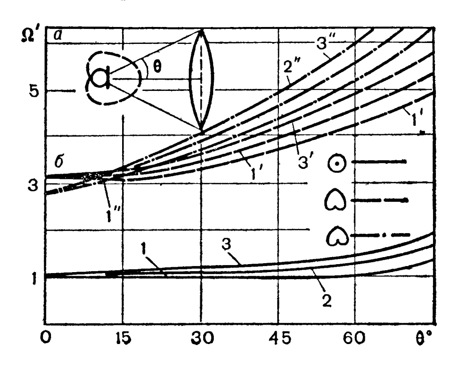


Рис. 8.9. Размещение эффективного звукопоглотителя относительно микрофона (*а*) и зависимость коэффициента направленности Ω' от угла $\theta°$ (*б*)

Если телесный угол, составленный границами этого материала и точкой размещения микрофона, будет равен $2\theta_1$ (рис. 8,9,*а*) диффузную энергию, принимаемую микрофоном, можно разделить на две части. Одна часть будет приходить к нему в пределах телесного угла, соответствующего плоскому углу $2\pi - 2\theta_1$, после отражения от поверхностей помещения. Другая часть будет приходить в пределах угла $2\theta_1$, отражаясь от эффективного звукопоглотителя.

Так как, согласно равенству (8.17),

$$\varepsilon^2_{\text{диф}} = \frac{\varepsilon^2_0}{\Omega},$$

то первая часть этой энергии будет определяться чувствительностью:

$$\varepsilon^2_{\text{диф}_1} = \varepsilon^2_0 \left(\frac{1}{\Omega} - \frac{1}{\Omega_\theta}\right), \qquad (8.19)$$

где Ω и Ω_θ — коэффициенты направленности — общий для данного микрофона и частный, определяемый в пределах угла $2\theta_1$.

Вторая часть диффузной энергии, приходящей к микрофону, благодаря воздействию эффективного материала будет уменьшена пропорционально отношению коэффициентов отражения $\frac{\beta_1}{\beta_2}$ и мо-

жет быть выражена через чувствительность, как

$$\varepsilon^2_{\text{диф}_2} = \varepsilon^2_0 \frac{1}{\Omega_\theta} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2} = \varepsilon^2_0 \frac{1-\alpha_1}{\Omega_\theta (1-\alpha_2)}. \tag{8.20}$$

Общая чувствительность микрофона в диффузном поле будет:

$$\varepsilon^2_{\text{диф}} = \varepsilon^2_{\text{диф}_1} + \varepsilon^2_{\text{диф}_2} = \varepsilon^2_0 \left[\frac{1}{\Omega} - \frac{1}{\Omega_\theta} + \frac{1-\alpha_1}{\Omega_\theta (1-\alpha_2)}\right]$$

или

$$\varepsilon^2_{\text{диф}} = \varepsilon^2_0 \frac{\Omega_\theta (1-\alpha_2) - \Omega (\alpha_1 - \alpha_2)}{\Omega\Omega_\theta (1-\alpha_2)}. \tag{8.21}$$

Из этого выражения легко найти новый коэффициент направленности

$$\Omega' = \frac{\varepsilon^2_0}{\varepsilon^2_{\text{диф}}} = \frac{\Omega\Omega_\theta (1-\alpha_2)}{\Omega_\theta (1-\alpha_2) - \Omega (\alpha_1 - \alpha_2)}. \tag{8.22}$$

Если этот коэффициент подставить в выражение (8.18), то эквивалентное время реверберации будет определяться таким равенством:

$$T_{\text{экв}} = \frac{1{,}2T}{1{,}2 + T \lg \left[\frac{\Omega\Omega_\theta (1-\alpha_2)}{\Omega_\theta (1-\alpha_2) - \Omega (\alpha_1 - \alpha_2)} + \frac{1}{R}\right]}. \tag{8.23}$$

Пользуясь формулой (8.22) и полагая, что Ω_θ отличается от Ω только пределами интегрирования, т. е. что

$$\Omega_\theta = \frac{2}{\int\limits_0^{\theta_1} \Phi(\theta) \sin\theta d\theta}, \tag{8.24}$$

где $\Phi(\theta)$ — функция, выражающая направленные свойства микрофона, можно определить зависимость коэффициента направленности системы, состоящей из микрофона и эффективного поглотителя (см. рис. 8.9, *а*) от угла θ. Эта зависимость показана на рис. 8.9, *б*. На нем кривые *1*, *2* и *3* отвечают случаю ненаправленного микрофона ($\Omega=1$) при времени реверберации, равном 1, 2 или 4 с; кривые *1'*, *2'*, *3'* соответствуют случаю применения кардиоидного микрофона ($\Omega=3$) при тех же значениях времени реверберации; кривые *1''*, *2''*, *3''* построены для микрофонов суперкардиоидного типа ($\Omega=5$).

Из рис. 8.9, *б* следует, что применение названной системы с ненаправленным микрофоном крайне неэффективно (кривые *1*—*3*). Этого нельзя сказать о применении в ней микрофона кардиоидного типа (кривые *1'*—*3'*), при котором коэффициент направленности системы возрастает с 3 до 7÷8. Еще быстрее происходит этот рост для микрофонов гипер- и суперкардиоидного типа (кривые *1''*—*3''*). Вместе с тем по кривым видно, что время реверберации помещения

на величину Ω почти не влияет. Его изменение с 1 до 4 с увеличивает Ω только на 15—20%. И, наконец, оказывается, что, судя по рис. 8.10, эквивалентная реверберация при увеличении угла θ изменяется все больше по мере увеличения расстояния между источником звука и микрофоном.

Следует заметить, что данный метод легко реализуется, например, в условиях ателье перезаписи, в которых, согласно современным тре-

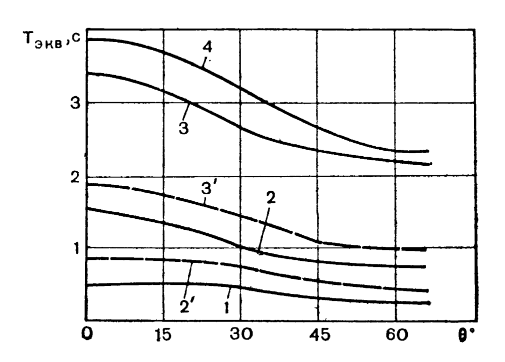


Рис. 8.10. Кривые $T_{экв}=f(\theta)$ для кардиоидного микрофона при r=0,3; 1; 4; 7 м и T=4 с (*1, 2, 3, 4*) и при r=1; 4 м и T=2 с (*2′, 3′*)

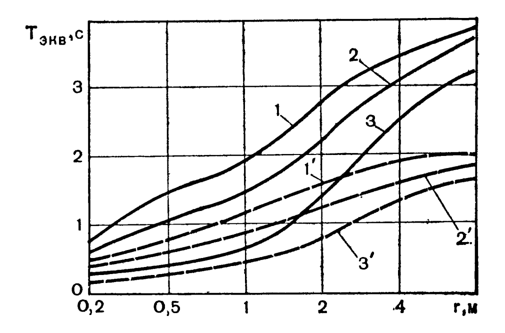


Рис. 8.11. Эквивалентная реверберация как функция от расстояния для ненаправленного (*1, 1′*) и кардиоидного микрофона без звукопоглотителя (*2, 2′*) и с ним (*3, 3′*) при *T* равном 4 и 2 с

бованиям, эффективно поглощающий материал размещается в широких пределах вблизи экрана и за ним.

О совместном действии всех трех методов управления временем реверберации можно судить по кривым на рис. 8.11. Непрерывные кривые показаны на нем для случая, когда T=4 с, а пунктирные — для случая T=2 с. Они показывают, что наиболее эффективным является первый метод, что второй из них расширяет пределы управления эквивалентной реверберацией, которые для всех методов тем шире, чем меньше заглушено помещение.

8.9. Управление временем реверберации при помощи переменного звукопоглощения

В Советском Союзе и за рубежом все чаще строят универсальные ателье, в которых временем реверберации можно управлять автоматически или вручную путем изменения площади эффективного звукопоглощающего материала, размещаемого в ателье.

Упрощая формулу (8.5), ее можно переписать в виде:

$$T = \frac{0,164V}{\sum\limits_{n} \alpha_n S_n} = \frac{0,164V}{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \cdots + \alpha_n S_n}. \quad (8.25)$$

Для хорошего заглушения ателье используют эффективный звукопоглощающий материал с большим α_1 и возможно большей площадью S_1. Произведение $\alpha_1 S_1$ обычно настолько больше других слагаемых знаменателя дроби (8.25), что с ними можно почти не считаться. Отсюда становится ясно, что уменьшение площади этого материала будет сопровождаться тем более быстрым возрастанием времени реверберации, чем бóльшим будет коэффициент поглощения α_1.

Этот метод управления, особенно в автоматическом режиме, имеет ряд преимуществ. Во-первых, широкая возможность изменения реверберации в нем позволяет проводить в одном помещении не только разнообразные по стилю музыкальные передачи в исполнении разнохарактерных ансамблей и оркестров, но и передачи любого речевого типа. Во-вторых, он не требует перестановки и замены микрофонов. И, наконец, что не менее важно, при нем число ателье, особенно на малых студиях, может быть уменьшено путем увеличения времени их использования, что недостижимо в специализированных ателье.

Автоматическое управление становится возможным в том случае, когда отдельные панели с эффективно звукопоглощающим материалом, составляющие систему акустической обработки, могут закрываться другим материалом с меньшим коэффициентом звукопоглощения. Может быть и другой вариант управления, когда панели вы-

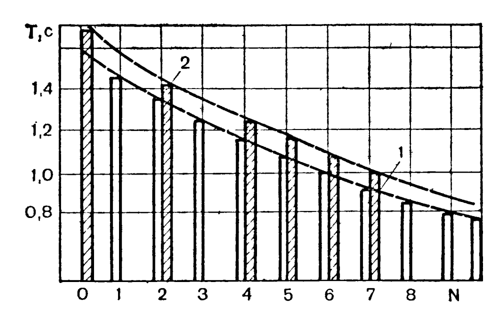


Рис. 8.12. Автоматизированное управление реверберацией тонателье: кривая *1* — расчетная и *2* — экспериментальная

водятся за пределы ателье при помощи электромеханического устройства, приходящего в движение при нажатии кнопки на пульте звукорежиссера.

Хотя последний вариант управления требует большого пространства для размещения убирающихся панелей и специальных подъемных устройств, он прост в эксплуатации и не занимает много времени. Главным же является то, что он позволяет звукорежиссеру осуществлять выбор такого времени реверберации, которое необходимо для очень многих практических случаев звукопередачи. В этом легко убедиться на примере большого тонателье киностудии «Ленфильм», данные об изменении времени реверберации в котором в зависимости от числа N убирающихся панелей приведены на рис. 8.12 [12].

8.10. Управление временем реверберации с использованием системы акустической обратной связи

Чтобы усилить звуковые сигналы, передаваемые в большом помещении, применяют систему звукоусиления, состоящую из микрофона, усилителя и громкоговорителя. При работе этой системы часть звуковой энергии от громкоговорителя поступает повторно к микрофону с некоторым запаздыванием. Степень обратного воздействия сигнала с выхода системы на ее вход определяется коэффициентом акустической обратной связи β. Как известно [15], в этом случае время реверберации в помещении выражается равенством

$$T_\beta = \frac{0{,}164V}{\alpha S - 0{,}012\dfrac{k^2\beta^2}{1+\beta^2-2\beta\cos\varphi}}. \quad (8.26)$$

Здесь k — коэффициент усиления системы и φ — сдвиг по фазе между прямым и повторным сигналами, действующими на микрофон. Этот сдвиг выражается произведением $2\pi f\Delta t$, где Δt — время запаздывания повторного сигнала и f — его частота.

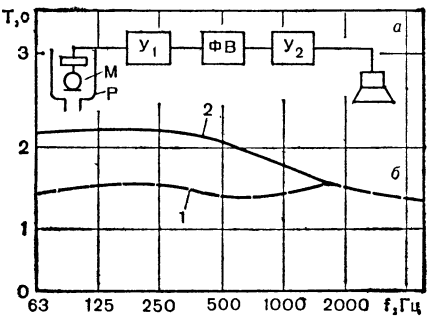


Рис. 8.13. Элемент системы акустической обратной связи (*а*) и результаты ее использования (*б*) для коррекции T в пределах между кривыми *1* и *2*

При изменении частоты сигнала $\cos\varphi$ будет принимать то положительное, то отрицательное значение, что, судя по равенству (8.26), приведет к изменению времени реверберации T_β по закону, близкому к тому, который представлен кривой на рис. 6.2, *а*. Эквивалентное время реверберации в процессе передачи сложных сигналов становится непостоянным.

Влияние акустической обратной связи на время ревербера-

ции можно использовать для управления последним, если создать систему с большим числом электроакустических каналов, настроенных на очень мало отличающиеся частоты (2÷4 Гц) и занимающих диапазон, в пределах которого предполагается осуществлять управление. Каждый канал (рис. 8.13, *а*) состоит из микрофона *М*, укрепленного на поршне, настраивающем на нужную частоту резонатор Гельмгольца *Р*. Между усилителями $У_1$ и $У_2$ находится фазовращатель *ФВ*, работающий так, что громкоговорители всех каналов излучают отраженные сигналы только с положительной или только с отрицательной акустической обратной связью при cosφ, близком к единице. При положительной связи в полосе частот, охватываемой каналами, время реверберации с изменением коэффициента связи β будет расти, а при отрицательной — падать. Причем изменение глубины обратной связи в ту или иную сторону приводит к относительному изменению T_β в достаточно широких пределах (рис. 8.13, *б*).

Этот способ управления естественной реверберацией был использован для коррекции акустических условий в Лондонском фестивальном зале на 3000 мест. Микрофоны и громкоговорители системы располагались в отверстиях подвесного потолка, и каждый из 172 ее каналов подвергался индивидуальной настройке. Результаты работы системы были одобрены рядом композиторов и дирижеров.

Несмотря на сложность данного метода управления естественной реверберацией, он в экономическом отношении сравним с методом переменного звукопоглощения, а в эксплуатационном отношении превосходит его. Этот метод отличается и от других рассмотренных методов значительно более широкими пределами изменения времени реверберации.

8.11. Субъективная оценка влияния акустики помещения на качество звукопередачи

При теоретическом определении оптимального и эквивалентного времени реверберации устанавливалась связь этих величин с другими объективными факторами, характеризующими акустические условия в помещении. Правда, при этом учитывались некоторые субъективные показатели, такие, как особенности слухового восприятия или художественный вкус современных слушателей. И все-таки оценки качества звукопередачи, ее связи с этими параметрами могут быть более точными при установлении их путем проведения опытов.

Такие опыты были проведены нами в семи помещениях (залах Государственной капеллы, Дворца культуры имени Первой пятилетки и др.) с различным временем реверберации, изменяющимся в пределах от 0,5 до 2,4 с. В процессе их проведения изменялось расстояние между источником звука и микрофоном, а качество звучания оценивалось субъективно по показаниям группы экспертов в количестве 15—20 человек.

По данным эксперимента для случая передачи дикторской речи

были построены кривые рис. 8.14, выражающие собой зависимость качества звучания от расстояния r до источника звука при использовании кардиоидного микрофона. На рисунке кривые *1, 2, 3, 4, 5* соответствуют помещениям, стандартное время реверберации в которых было равным 1,2; 1,4; 1,6; 2,2; 2,4 с. Из него следует, что в помещениях с близкими значениями этого времени качество звучания очень отличается. Это объясняется тем, что воспринимаемая

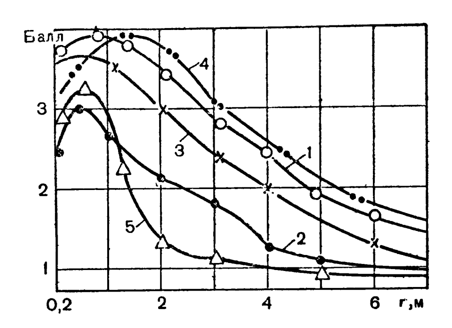


Рис. 8.14. Зависимость качества звучания речи от расстояния r для помещений с различным временем реверберации

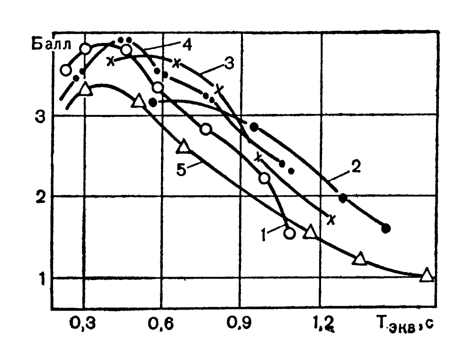


Рис. 8.15. Зависимость качества звучания речи от эквивалентной реверберации $T_{экв}$. Кривые *1—5* соответствуют T, равным 1,2; 1,4; 1,6; 2,2; 2,4 с

экспертами реверберация зависит не только от стандартной реверберации и расстояния r, но и от других величин, которые, судя по формуле (8.10), влияют на эквивалентную реверберацию. Очевидно, что связь качества звучания с эквивалентной реверберацией более однозначна, чем со стандартной, а поэтому по данным эксперимента были построены новые кривые, связывающие качество звучания уже с $T_{экв}$. Они показаны на рис. 8.15 с сохранением обозначений рис. 8.14. На новом рисунке разброс кривых заметно уменьшился. Это позволяет использовать их для определения рабочего расстояния r, при котором качество звукопередачи будет хорошим (не ниже балла 3). Сначала по ним необходимо найти значение $T_{экв}$, соответствующее заданному качеству звучания, потом, подсчитав численное значение отношения $\frac{T_{экв}}{T}$ для данного помещения, по графику рис. 8.6 определить соответствующее расстояние r.

Влияние характера звуковой информации на выбор оптимального значения $T_{экв}$ и соответствующего ему расстояния между источником и приемником звука иллюстрируется рис. 8.16. На нем приведены результаты экспериментов, выполненных в помещениях с $T=2{,}4$ с (кривые $1_а$, $1_б$, $1_в$, $1_г$) и $T=1{,}0$ с ($2_а$, $2_б$). Индексы *а, б, в, г* у номеров кривых соответствуют случаям передачи речи, пения (то и другое в мужском исполнении), звучания фортепиано и малого музыкального ансамбля.

Рис. 8.16 показывает, что для одного и того же помещения кривые зависимости качества звучания от расстояния r при переходе от

речевой передачи к передаче вокальной или инструментальной музыки становятся все более пологими. Следовательно, речевая семантическая информация наиболее критична к изменению расстояния от микрофона до исполнителя. Эта критичность для речи приводит в помещении с $T=2{,}4$ с к снижению оценки звучания ниже удовлетворительной при увеличении расстояния r за пределы 1,0 м (кривая $1_а$); для пения (кривая $1_б$) такое снижение качества имеет место при расстоянии в два раза, а для фортепиано (кривая $1_в$) и музыкального ансамбля в $4\div6$ раз большим, чем для речи. Указанные различия для помещений с меньшим временем реверберации (кривые $2_а$ и $2_б$) становятся заметно меньшими.

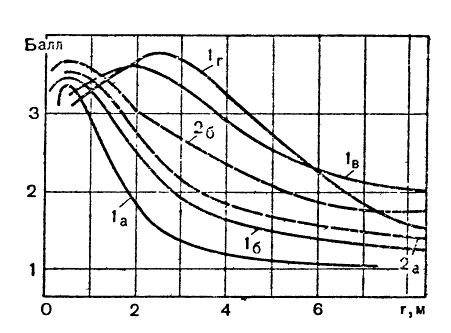


Рис. 8.16. Влияние расстояния r на качество передачи звучаний различных источников звука при T равном 2,4 и 1,0 с

По материалам опытов можно сделать несколько общих выводов:

1. При очень малых расстояниях между источником звука и микрофоном ($r=0{,}2\div0{,}3$ м) качество звучания не является наилучшим для всех видов программ. При речевых передачах сказываются искажения ближнего поля, при музыкальных к этой причине прибавляется другая — обнаруживается разноплановость звучания различных инструментов.

2. Наивысшее качество звучания в разных помещениях имеет место при отличающихся расстояниях r, зависящих от вида источника звука и времени реверберации в них. Для речи это расстояние наименьшее, для пения, фортепиано, малого ансамбля оно становится все бо́льшим. Для этих видов звучания и помещений с T равным 1 и 2,4 с, это расстояние изменяется в пределах от 0,5 до $2{,}5\div3{,}0$ м.

3. Последующее увеличение расстояния r влечет за собой снижение качества звучания, что происходит быстрее в помещениях с большим временем реверберации.

4. Так как эквивалентное время реверберации зависит не только от стандартного времени реверберации, но и от других параметров помещения и условий звукопередачи, то связь между качеством звучания и $T_{экв}$ представляется более определенной.

8.12. Об управлении временем прихода первых отражений

Качество речевых и музыкальных передач, проводимых в помещениях, зависит от того, на сколько запаздывают сигналы первых отражений, принимаемые слушателями, по отношению к прямым. Время запаздывания Δt_1 этих сигналов определяется размерами помещения, а также расположением источника и приемника звука в

нем. И так как для помещений обычно самым малым размером является высота, то она и будет определять время запаздывания первых отражений. Это время, выраженное в миллисекундах, можно найти по формуле:

$$\Delta t_1 = \frac{l_1 - l_0}{c_0} = 3\,(l_1 - l_0), \qquad (8.27)$$

где l_0 — длина прямого луча от источника до приемника звука, равная

$$l_0 = \sqrt{h^2 + x^2 + y^2},$$

а l_1 — длина луча первого отражения от потолка, определяемая как

$$l_1 = \sqrt{(2H - h)^2 + x^2 + y^2}.$$

В этих равенствах H — высота помещения, h — высота размещения источника и приемника звука, x и y — координаты приемника.

Если помнить, что общий микрофон, принимающий реверберационный сигнал, обычно размещается на линии, совпадающей с осью y (см. рис. 8.17, *а*), то можно рассчитать и построить кривые зависимости времени запаздывания Δt_1 от расстояния x до источника, изображенные на рис. 8.17, *б*. Цифры у кривых означают высоту помещения, а штриховкой показаны зоны оптимальных значений Δt_1 для речевых (нижняя) и для музыкальных (верхняя) передач. Учитывая, что длина помещения связана с его высотой, а общий микрофон, как и источник звука, устанавливается не ближе 3÷5 м от стен, указанные зоны нужно ограничить соответственно линиями A и B.

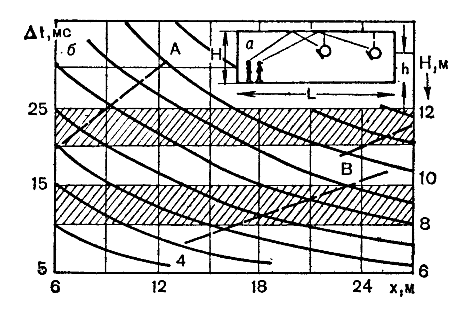


Рис. 8.17. Номограмма для определения местоположения микрофона, при котором Δt оптимально

Из графика рис. 8,17, *б* следует, что в помещениях, высота которых менее 4 м, имеющих объем $V \leqslant 380$ м^3 (при отношении $L:\text{B}:\text{H} = 3:2:1$), получить оптимальное время запаздывания для речевых передач (10÷15 мс) удается при расстоянии от исполнителя до общего микрофона порядка 3÷5 м. Для этих передач высоту H желательно иметь не менее 5÷6 м ($V > 750$ м^3), чтобы нужное значение Δt_1 получать при удалении общего микрофона на оптимальное расстояние 5÷7 м от исполнителя. В случае музыкальных передач необходимое время запаздывания (20÷25 мс) обеспечивается при высоте помещения, изменяющейся в широких пределах. Однако, имея в виду, что оркестр может занимать до 0,3 площади ателье, а общий микрофон следует отодвинуть от оркестра еще хотя бы на 0,1 L, зона оптимальных значений Δt_1 сокращается, ограни-

чиваясь линиями A и B. Как следует из рис. 8.17, при высоте потолка 8 м можно получить нужный эффект только для малых ансамблей. При передаче звучания больших оркестров высота ателье должна быть больше 9 м.

Таким образом, графики на рис. 8.17 позволяют при знании высоты ателье и численного состава исполнителей правильно разместить общий микрофон и тем самым обеспечить управление временем запаздывания первого отражения.

Глава 9.

ИСКУССТВЕННЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ АКУСТИКОЙ СТУДИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

9.1. Классификация систем искусственной реверберации

Обзор методов управления естественной реверберацией помещений показал, что одни из них недостаточно эффективны (например, метод изменения направленности микрофона), другие громоздки и дорогостоящи (метод переменного звукопоглощения). Это побудило к поиску устройств, которые, имитируя реверберационный процесс помещения, были бы просты и позволяли бы изменять искусственную реверберацию в практически необходимых пределах.

Так как реверберационный процесс выражает собой затухание собственных колебаний объема воздуха в помещении, то имитирующие устройства искали среди других колебательных систем. Появились струнные, пружинные, листовые (пластинчатые) и объемные (гулкие камеры) ревербераторы, т. е. колебательные системы с одной, двумя и тремя степенями свободы. Эти системы отличаются от применяемых в музыкальных инструментах (струны, пластины, бруски) тем, что их собственные колебания обладают рядом акустических характеристик, близких к соответствующим характеристикам помещения. Следовательно, ревербераторы данного типа кроме создания управляемого времени реверберации должны обладать равномерной частотной характеристикой и такими временны́ми и частотными спектрами отраженных сигналов, которые были бы похожи на спектры имитируемого помещения.

К числу устройств колебательного типа следует отнести многорезонансные системы, в которых для управления реверберацией применяется большое число акустических резонаторов, настроенных на близкие частоты.

Существуют ревербераторы неколебательного типа с механическими и электронными линиями задержки. Они характеризуются наличием механизма, создающего многократное повторение исходного сигнала с постепенно уменьшающейся амплитудой. К этой группе относятся магнитный и электронный ревербераторы.

Если рассмотренные ревербераторы по принципу действия представляют собой системы *колебательного* и *неколебательного* типов, то по техническому исполнению их можно разделить на три группы: *акустические, электроакустические* и *комбинированные*. К первой группе нужно отнести гулкие камеры, ко второй — листовые, пружинные, магнитные и электронные ревербераторы и, наконец, к третьей — амбиофонические и многорезонансные системы.

Управление искусственной реверберацией осуществляется: *относительным изменением уровней* основного и прошедшего через ре-

верберататор дополнительного *сигналов* или *изменением скорости затухания* последнего из них. Эти способы вскрываются при рассмотрении схемы управления реверберацией, показанной на рис. 9.1. На ней исходный сигнал U разделяется на два — прямой и ответвленный к ревербератору *ИР*. После усиления и регулирования с помощью регуляторов P_1 и P_2, эти сигналы вновь соединяются. Изменяя регуляторами соотношения уровней прямого и реверберационного сигналов получают необходимое время реверберации первым способом. Второй — реализуется изменением крутизны кривой затухания в самом ревербераторе *ИР*.

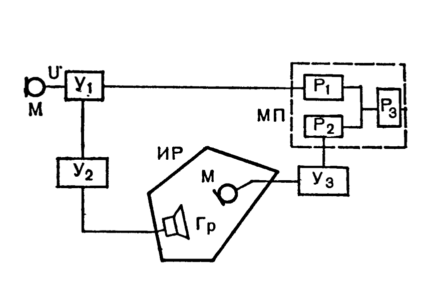


Рис. 9.1. Схема включения ревербератора: $У_1$, $У_2$, $У_3$ — усилители; P_1, P_2, P_3 — регуляторы уровней сигнала; *МП* — микшерский пульт

Рис. 9.2. Изменение результирующей реверберации $T_р$ — в зависимости от значения реверберации естественной T_0 и искусственной $T_{ис}$

9.2. Общие свойства систем искусственной реверберации

Так как искусственный реверберационный сигнал подмешивается к сигналу, записанному в помещении, то суммарный эффект будет таким же, как в случае электроакустической связи между помещениями звукопередачи и звуковоспроизведения. Для этого случая, согласно эмпирической формуле М. А. Сапожкова, результирующая реверберация

$$T_р^3 = T_0^3 + T_{ис}^3, \qquad (9.1)$$

где T_0 можно рассматривать как время естественной реверберации, а $T_{ис}$ — как время реверберации, созданное искусственным путем.

Формулу (9.1) можно переписать в виде:

$$\left(\frac{T_р}{T_0}\right)^3 = 1 + \left(\frac{T_{ис}}{T_0}\right)^3. \qquad (9.2)$$

Как видно из графика, построенного по этой формуле (рис. 9.2), для случаев, когда искусственная реверберация меньше естественной $\left(\frac{T_{ис}}{T_0} < 1\right)$, влияние первой на результирующую ничтожно

малó. При равенстве этих реверберации $\left(\frac{T_{ис}}{T_0}=1\right)$ суммарная возрастает только в 1,2 раза. Зато последующий рост искусственной реверберации по отношению к естественной $\left(\frac{T_{ис}}{T_0}>1\right)$ быстро приводит к тому, что она становится определяющей в создании суммарного эффекта. Следовательно, подмешивание искусственной реверберации становится эффективным при $(T_{ис}>T_0)$ и, так как естественная реверберация обычно невелика, то ревербераторы позволяют осуществлять управление временем реверберации в широких пределах — от T_0 до $T_{ис}$.

Если искусственная реверберация в общем процессе становится основной, то она по своим акустическим характеристикам должна быть неотличимой от естественной, что возможно при близком сходстве их частотных характеристик, временны́х и частотных спектров. Первый из них связан с особенностями данной реверберационной системы, тогда как второй определяется исходя из некоторых общих положений.

Как известно, для системы колебательного типа можно составить дифференциальное уравнение. Его решение вида (2.1) позволяет найти значение каждой собственной частоты f_n и подсчитать плотность спектра собственных частот Δn в любом заданном их интервале Δf_n. Эти величины могут быть определены из наиболее общих формул, которые получены для случая трехмерной системы [15] в виде:

$$f_n=\frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2+\left(\frac{n_y}{B}\right)^2+\left(\frac{n_z}{H}\right)^2}, \tag{9.3}$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta f_n}=\frac{4\pi V}{c^3}f_n^2+\frac{\pi\left(S_{xy}+S_{xz}+S_{yz}\right)}{c^2}f_n+\frac{L+B+H}{2c}, \tag{9.4}$$

где n_x, n_y, n_z — любое число натурального ряда; L, B, H и V — линейные размеры системы и ее объем; S_{xy}, S_{xz}, S_{yz} — площади взаимно перпендикулярных ее поверхностей; c — скорость распространения колебаний.

Из формулы (9.3) следует, что для трехмерных колебательных систем (гулких камер) собственные частоты, находясь в обратной зависимости от линейных размеров системы, возрастают беспредельно. Следовательно, чем больше эти размеры, тем ниже ее первые, ограничивающие спектр снизу, собственные частоты и тем быстрее уплотняется частотный спектр.

Согласно формуле (9.4), плотность спектра выражается тремя слагаемыми, каждое из которых связано с характером распространения звуковых волн. Первое слагаемое относится к волнам косого типа, распространяющимся в объеме системы, отражаясь от всех ее внутренних поверхностей. Второе — к волнам касательного типа, которые распространяются в плоскости каждой из поверхностей

S_{xy}, S_{xz} и S_{yz}. И, наконец, третье — к волнам осевого типа, распространяющимся вдоль направлений, совпадающих с длиной L, шириной B и высотой H системы. Общая плотность спектра для трехмерной системы возрастает больше всего из-за первого слагаемого, пропорционального квадрату граничной частоты f_n, поменьше из-за второго, пропорционального этой частоте, и совсем мало из-за третьего, постоянного по величине слагаемого.

Если система двухмерная (например, листовой ревербератор), то для нее $n_z = 0$, $V = 0$, $S_{xz} = S_{yz} = 0$ и формулы (9.3) и (9.4) принимают вид:

$$f_n = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2}, \tag{9.5}$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta f_n} = \frac{\pi S_{xy}}{c^2} f_n + \frac{L+B}{2c}. \tag{9.6}$$

Эти формулы показывают, что начальные собственные частоты почти не меняют своих значений, однако их плотность заметно уменьшается. Исчезают не только многочисленные собственные частоты, связанные с колебаниями косого типа, но и значительная часть тех, которые обусловлены колебаниями касательного и осевого типов.

Переходя к одномерным системам (например, струна), для которых дополнительно обращаются в ноль S_{xy} и B, можно формулы (9.3) и (9.4) представить в виде:

$$f_n = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2} = n_x \frac{c}{2L}, \tag{9.7}$$

$$\frac{\Delta n}{\Delta f_n} = \frac{L}{c}. \tag{9.8}$$

В этом случае, судя по формулам, нижняя граница спектра почти не изменяется, а плотность спектра становится постоянной и очень малой.

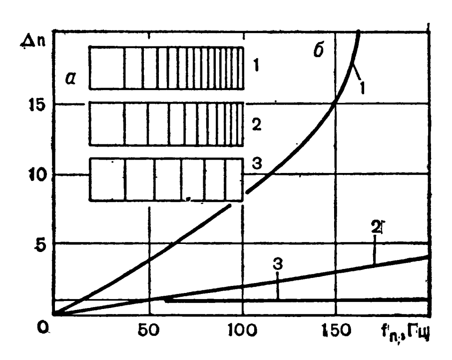


Рис. 9.3. Частотные спектры и кривые зависимости плотности спектра от частоты f для трехмерных (*1*), двухмерных (*2*) и одномерных (*3*) систем.

Выводы, сделанные на основании формул, хорошо иллюстрирует рис. 9.3, *а*, *б*, на котором приведены спектры трех-, двух- и одномерной систем и кривые зависимости Δn от f_n при $\Delta f_n = 10$, построенные для этих трех случаев.

Методы управления искусственной реверберацией путем изменения уровня подмешиваемого сигнала или скорости его затухания отличаются по своим результатам. При первом из них уровень

подмешиваемого сигнала меньше основного, начальный этап суммирования определяется самим помещением, а искусственная реверберация сказывается на завершающем этапе. Во втором случае, когда сигналы примерно равны, искусственная реверберация проявляет себя и в начале процесса. Поэтому если объем помещения таков, что время запаздывания первых отражений для него оптимально, то увеличения общей реверберации следует добиваться первым методом. Второму же отдают предпочтение, когда время запаздывания начальных отражений не отвечает требованиям, а искусственный метод позволяет приблизить это время к оптимальному.

В итоге отметим ряд особенностей искусственной реверберации.

1. Управление отзвуком осуществимо в пределах времени реверберации, созданного помещением и данным ревербератором.

2. В целях сохранения структуры ранних отражений, характерной для помещений, управление искусственной реверберацией следует проводить путем изменения уровня подмешиваемого сигнала.

3. Уменьшение размеров систем искусственной реверберации приводит к уплотнению и все большему смещению спектра собственных частот в высокочастотную область.

4. При переходе от использования трехмерной к двух- или одномерной системе резко уменьшается плотность спектра собственных частот и снижается качество реверберационного сигнала.

9.3. Гулкие камеры

Системой, создающей дополнительный реверберационный эффект, может быть небольшое помещение ($V=100\div200$ м^3), чаще с непараллельными поверхностями, имеющими малый коэффициент звукопоглощения (на рис. 9.1 обозначено через *ИР*). В камере размещают громкоговоритель *Гр*, к которому подводят усиленную часть основного сигнала. Создаваемый в ней сильно реверберирующий сигнал принимается микрофоном *М*, усиливается и подается на регулятор уровней P_2, который, как и регулятор прямого сигнала P_1, находится на пульте звукорежиссера и используется для управления реверберацией.

Таким образом, для создания искусственной реверберации здесь применяют акустическую трехмерную систему, которая благодаря малому звукопоглощению имеет широкие пределы регулирования времени реверберации (до $6\div7$ с) и достаточно равномерную частотную характеристику. Как следует из формулы (9.4), гулкие камеры, подобно другим помещениям, имеют уплотняющийся спектр собственных частот, что делает дополнительную реверберацию похожей на основную, передаваемую по прямому каналу. Однако в связи с малыми размерами камеры первые собственные частоты, как следует из формулы (9.3), оказываются заметно более высокими, а плотность спектра в области низких частот — недостаточной по сравнению с большими помещениями для звукопередач. Это приводит к флюктуации низкочастотных затухающих сигналов, обнаруживаемой на слух. Для ее устранения в некоторых радиодомах применяют

резонаторы в виде деревянных ящиков, сглаживающие неравномерность реверберирующих сигналов. Флюктуацию можно устранить, уплотняя спектр в низкочастотной области путем одновременного использования нескольких гулких камер, отличающихся друг от друга по размерам.

При малых размерах гулких камер, как это следует из рис. 8.17, время запаздывания первых Δt_1 и вторых Δt_2 отражений не отвечает не только тем значениям, которые характеризуют концертные передачи, ведущиеся из больших ателье, но и тем, которые определяют оптимальные условия речевых передач. Эти значения в три и больше раз отличаются от оптимальных. Следовательно, гулкая камера исключает возможность создания впечатления о некотором большом реверберирующем помещении и тем более не позволяет изменять это впечатление, что необходимо для высококачественной передачи звучаний.

Этот недостаток обычно устраняют, подключая к гулкой камере дополнительное устройство, создающее необходимые по величине временны́е задержки первых отраженных сигналов.

Управление реверберационным эффектом можно осуществить изменением соотношения уровней сигналов N_0 и $N_к$, поступающих по прямому каналу и из гулкой камеры. Если регулятором P_2 уменьшить уровень $N_к$, то время искусственной реверберации $T_{ис}$, будучи равным $\frac{N_к}{N_0} T_к$, также уменьшится, а формула (9.2) примет вид:

$$\left(\frac{T_р}{T_0}\right)^3 = 1 + \left(\frac{N_к}{N_0} \cdot \frac{T_к}{T_0}\right)^3, \qquad (9.9)$$

где $T_к$— время стандартной реверберации гулкой камеры.

Судя по формуле (9.9), результирующее время реверберации по мере уменьшения отношения $\frac{N_к}{N_0}$ будет убывать согласно кривой на рис. 9.2 от значения этого времени для гулкой камеры до его значения для первичного помещения. При этом способе управления, как можно заметить из рис. 8.17, уменьшение отношения $\frac{N_к}{N_0}$, не изменяя временно́й структуры затухающего сигнала, приводит к постепенному укорочению спектра на его конце. Однако это происходит в пределах достаточно высоких плотностей спектра, и, следовательно, данный способ управления практически не влияет на временны́е характеристики общего процесса.

Из схемы рис. 9.1 видно, что управлять реверберацией можно и путем изменения расстояния r между работающими в гулкой камере громкоговорителем и микрофоном. Так как время стандартной реверберации камеры велико, то пределы изменения эквивалентной реверберации (см. параграф 8.6) будут достаточно широкими, а сам способ управления эффективным. Как видно из рис. 8.17, при этом способе управления одновременно с временем реверберации изменяется и временна́я структура реверберационного процесса, протекающего в гулкой камере. Недостаток этого метода управле-

ния — его относительная сложность. К числу общих недостатков гулких камер следует отнести:

1. Появления флюктуаций в процессе затухания сигнала, связанных с малой плотностью собственных частот у нижней части спектра.

2. Малое значение времени запаздывания первых отражений, не позволяющее имитировать процесс затухания в больших помещениях.

9.4. Листовые ревербераторы

Основным элементом листового ревербератора является тонкий (0,4÷0,5 мм) стальной лист размером 1×2 м, упруго прикрепленный по углам к вертикально поставленной раме. С одной стороны листа *Л* (рис. 9.4, *а*) находятся электродинамический возбудитель *В* и пьезоэлектрический приемник *П*. Звуковая катушка возбудителя соединена с металлическим конусом, острие которого приварено к листу. Сигнал от микрофона подается через регулятор уровней на пульт звукорежиссера *МП* и параллельно на возбудитель ревербератора. Пьезоэлектрический приемник соединен через усилитель $У_3$ с другим регулятором звукооператорского пульта.

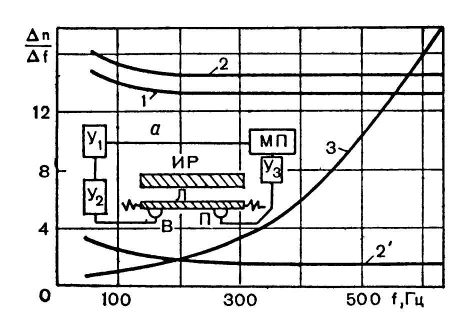


Рис. 9.4. Схема (*а*) и кривые плотности спектра собственных частот листового ревербератора (*б*)

Сигналы звуковой частоты приводят в колебания возбудитель и скрепленный с ним лист ревербератора. Колебания изгиба — как поступающие от возбудителя, так и отраженные от краев листа — принимаются и преобразуются приемником в реверберирующий сигнал. Таким образом, листовой ревербератор представляет собой, по существу, двухмерную колебательную систему электроакустического типа, затухающие колебания которой используются для имитации реверберационных процессов.

Формулы (9.5) и (9.6), относящиеся к таким системам, позволяя уяснить причины значительного уменьшения у них числа собственных частот, не дают точных значений частот и плотности их спектра при упругой подвеске колеблющейся пластины. Дело в том, что решение дифференциального уравнения для пластины при указанных граничных условиях еще не получено. Приближенные же методы решения показывают, что граничные условия почти не сказываются на результатах только тогда, когда $n_x > 10$ и $n_y > 10$, т. е. при расчетах собственных частот высшего порядка. В этом случае фазовая скорость распространения изгибных волн в дисперсной среде пластины представляется в виде:

$$c = \sqrt[4]{4\pi^2 f_n^2 \frac{B_c}{M}} = \sqrt[4]{4\pi^2 f_n^2 \frac{B_c}{h\rho}}, \qquad (9.10)$$

где B_c и M — цилиндрическая жесткость пластины и ее масса на единицу поверхности; h и ρ — толщина и удельная плотность пластины.

Отсутствие заметного влияния граничных условий для рассматриваемого случая позволяет выражение (9.10) подставить в равенства (9.5) и (9.6), в результате чего первое из них принимает вид:

$$f_n = \frac{1}{2} \sqrt[4]{4\pi^2 f_n^2 \frac{B_c}{h\rho}} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2}.$$

Возведя в квадрат обе части этого равенства, можно написать, что:

$$f_n^2 = \frac{2\pi f_n}{4} \sqrt{\frac{B_c}{h\rho}} \left[\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2\right].$$

Отсюда:

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B_c}{h\rho}} \left[\left(\frac{n_x}{L}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{B}\right)^2\right]. \qquad (9.11)$$

Произведя подстановку (9.10) в равенство (9.6), можно получить следующее выражение для плотности спектра собственных частот:

$$\frac{\Delta n}{\Delta f_n} = \frac{\pi S_{xy}}{2} \sqrt{\frac{\rho h}{B_c}} + \frac{L+B}{2\sqrt{2\pi f_n}} \sqrt[4]{\frac{\rho h}{B_c}}. \qquad (9.12)$$

Вычисления по формулам (9.11) и (9.12) и приближенные расчеты для случая, когда $2 < n_x < 10$, позволяют построить кривые $\frac{\Delta n}{\Delta f_n} = \varphi(f_n)$, приведенные на рис. 9.4, *б*. На нем кривая *1* построена для стальной пластины ревербератора ЕМТ-140 (соотношение $\frac{S}{h} = 4 \cdot 10^3$; кривые *2* и *2'* — для никелевых пластин с соотношением $\frac{S}{h} = 4 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^2$ соответственно и кривая *3* — для помещения с $V = 150$ м^3.

Из рис. 9.4, *б* следует, что у ревербератора по сравнению с помещением плотность спектра собственных частот изменяется крайне медленно, а в начале спектра она излишне велика. Как следует из равенства (9.10), хотя скорость распространения волн в материале листа сильно снижается, так как плотность его по сравнению с воздушной средой много больше, однако это с избытком перекрывается уменьшенными размерами листа. В результате время запаздывания первых отражений для ревербератора уменьшается до 6÷10 мс. Вот почему для создания временны́х интервалов, имитирующих первые отражения больших помещений, вместе с листовым ревербератором обычно используется система задержек.

Время стандартной реверберации, выражаемое через показатель затухания энергии δ, представляется в виде:

$$T = \frac{6}{\delta \lg e} = \frac{13,8}{\delta}. \qquad (9.13)$$

Для листового ревербератора показатель затухания δ обусловлен как внутренними потерями энергии в листе, связанными с его массой M, так и с сопротивлением излучения r_R пластины, вследствие чего

$$T = \frac{13,8}{\delta} = 13,8 \frac{M}{r_R} = 13,8 \frac{h\rho}{r_R}. \qquad (9.14)$$

Отсюда следует, что общее время реверберации для пластины складывается из двух составляющих: $T_в$ — обусловленного внутренним сопротивлением и $T_и$ — зависящего от сопротивления излучения, или, что

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_в} + \frac{1}{T_и} \text{ и } T = \frac{T_в + T_и}{T_в T_и}. \qquad (9.15)$$

Если первая составляющая для каждого листового ревербератора остается неизменной, то вторая может изменяться в зависимости от степени приближения к листу звукопоглощающего материала. Таким образом, изменяя $T_и$, можно управлять общим временем реверберации T. Как видно из кривых на рис. 9.5, приближение звукопоглощающей панели к колебательной системе кроме уменьшения времени реверберации вызывает еще сглаживание его частотной характеристики. Спад характеристики на средних и высоких частотах корректируется обычно соответствующим подъемом характеристики усилительных устройств. Так как колебательная система данного ревербератора чувствительна к внешним шумам (с уровня порядка 50 дБ), то ее устанавливают в специальном помещении.

Преимуществами листового ревербератора являются: возможность получения достаточно большой плотности спектра собственных частот в среднечастотной области, отсутствие флюктуаций ревербе-

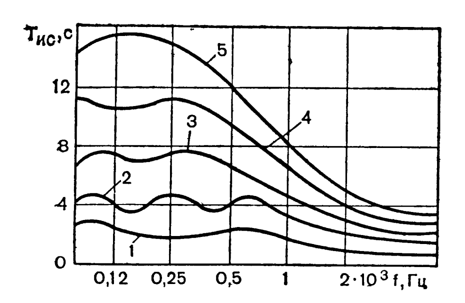


Рис. 9.5. Характеристики времени реверберации листового ревербератора при расстоянии до звукопоглощающей панели 0,5 см (*1*), 1 см (*2*), 2 см (*3*), 3 см (*4*), 10 см (*5*)

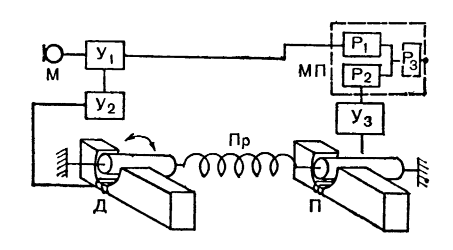


Рис. 9.6. Схема включения пружинного ревербератора: *Д* — датчик; *Пр* — пружина; *П* — приемник

рационного процесса и простота обслуживания. Недостатки же заключаются в том, что у него мало́ время запаздывания первых отражений, нужна коррекция частотной характеристики системы, прослушивается металлический призвук, увеличивается влияние внешних шумов.

9.5. Пружинные ревербераторы

В ревербераторах этого типа рабочим органом является стальная спиральная пружина *Пр*, состоящая из двух частей, с витками, намотанными в противоположном направлении (рис. 9.6). Концы пружины крепятся к роторам электромагнитных датчика *Д* и приемника *П*, которые через демпферы с помощью проволочек соединены с неподвижными опорами. Как показано на схеме рис. 9.6, часть сигнала звуковой частоты подводится к катушке возбуждения первого электромагнита, поле которого вынуждает ротор датчика совершать крутильные колебания. Последние передаются пружиной ротору приемника, в результате чего в обмотке второго электромагнита индуцируются электрические сигналы, подобные сигналам, поступающим к датчику. Часть энергии крутильных колебаний отражается от ротора приемника в сторону датчика и вновь отражается, возвращаясь к ротору приемника с некоторым запаздыванием. Потеря энергии при каждом отражении приводит к постепенному их затуханию.

Собственные частоты колебаний системы могут быть найдены, если известна скорость распространения их вдоль пружины. Эта скорость

$$c = \frac{rL}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}, \qquad (9.16)$$

где r и ρ — радиус поперечного сечения проволоки и плотность материала, из которого она сделана; L и R — длина и радиус витка пружины; ε — модуль упругости Юнга.

Если считать пружину одномерной системой, то согласно выражению (9.7), ее собственные частоты определяются как:

$$f_n = \frac{c}{2L} n_x = \frac{rn_x}{8\pi R^2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}. \qquad (9.17)$$

Так как пружину только условно можно отнести к одномерным системам, то для нее это выражение имеет несколько другой вид, а именно:

$$f_n = \frac{rn_x}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \cdot \frac{\pi}{2(m+1)}. \qquad (9.18)$$

В этом выражении m — число витков пружины, а

$$\frac{r}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} = f_m$$

представляет собой так называемую *частоту среза*, т. е. частоту, выше которой плотность частотного спектра пружины становится равной нулю. Учитывая это, выражение (9.18) можно переписать в виде:

$$f_n = \frac{n_x \pi}{2(m+1)} f_m. \tag{9.19}$$

Отсюда интервал между соседними частотами спектра определится как:

$$\Delta f_n = \frac{\pi}{2(m+1)} \sqrt{f_m^2 f_n^2} = \frac{\pi}{2(m+1)} f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f_n}{f_m}\right)^2}, \tag{9.20}$$

а время задержки отраженных сигналов выразится равенством:

$$\Delta t_n = \frac{2(m+1)}{\pi} \cdot \frac{4\pi R^2}{r\sqrt{1 - \left(\frac{f_n}{f_m}\right)^2}} \sqrt{\frac{\rho}{\varepsilon}} = \frac{8R^2(m+1)}{r\sqrt{1 - \left(\frac{f_n}{f_m}\right)^2}} \sqrt{\frac{\rho}{\varepsilon}}. \tag{9.21}$$

Из выражений (9.19), (9.20) и (9.21) видно, что как значения собственных частот, их плотность спектра, так и время задержки отраженных сигналов зависят прежде всего от материала и параметров пружины ревербератора. Для расширения частотного диапазона ревербератора нужно увеличить частоту среза f_m путем увеличения отношения r к R, что приводит, однако, к нежелательному увеличению интервала Δf_n между соседними частотами спектра. Чтобы избежать этого, ревербераторы делаются из двух и более пружин, имеющих все более высокую частоту среза. Из формулы (9.20) следует, что по мере увеличения собственной частоты f_n интервал Δf_n сначала почти не меняется. Только при приближении f_n к частоте среза f_m он начинает быстро сокращаться, а спектр все больше уплотняться.

Почти постоянными и малыми по величине будут временны́е интервалы Δt между отражениями. Следовательно, спектр собственных частот ревербератора в начале слабо уплотнен, что вызывает флюктуации в процессе затухания, а временно́й спектр уплотнен слишком, что не отвечает спектрам реальных помещений. Очевидно, ревербератор с несколькими пружинами может устранить флюктуации, но устранить несоответствие в плотности временно́го спектра он не в состоянии.

Данные улучшенных пружинных ревербераторов, например типа ПР-3 с шестью пружинами, для которых Δt равно 29, 33, 43, 63, 71 и 77 мс, хорошо отвечают теоретическим расчетам. Они позволяют получить $T_{\text{ис}}$ от 2 до 5,5 с (на $f=400$ Гц), достаточно широкий частотный диапазон 150—4000 Гц и отношение полезного сигнала к шуму больше 50 дБ. Однако и у таких ревербераторов имеется ряд недостатков:

1. Их время реверберации не изменяется в процессе работы.

2. Структура первых отражений неуправляема и не отвечает структуре реальных помещений. Нужны дополнительные линии задержки.

3. Не всегда удается устранить металлический призвук.

4. Уровень собственных шумов недостаточно низок.

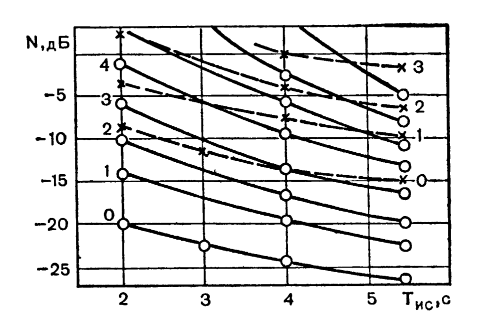


Рис. 9.7. Снижение качества звучания при увеличении искусственной реверберации ($T_и$) и уровня подмешиваемого сигнала (*N*)

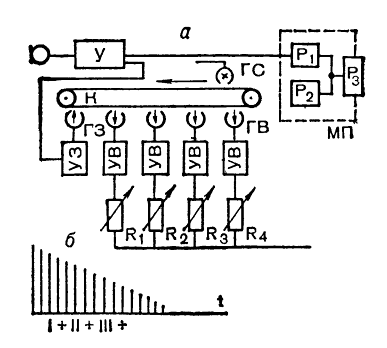


Рис. 9.8. Схема включения магнитного ревербератора (*а*) и спектр поступающих от него сигналов (*б*)

В связи с этими недочетами экспериментально был установлен ряд ограничений в использовании ревербераторов. Как видно из рис. 9.7, если нужно иметь $T_{ис} = 2$ с, то только при $N = -20$ дБ для речи (сплошные кривые) и -10 дБ для пения (прерывистые кривые), подмешивание искусственной реверберации остается незаметным (различимость равна нулю). Если нужно больше $T_{ис}$, то уровень подмешиваемого сигнала *N* должен быть снижен. Кривые *1*, *2*, *3*, *4* отвечают одинарному, двойному и т. д. порогу слухового обнаружения подмешиваемого сигнала.

9.6. Магнитные ревербераторы

В ревербераторах магнитного типа реверберационный сигнал создается без помощи колебательной системы. Она заменена устройством, позволяющим формировать реверберационный эффект из многократных повторений основного сигнала со сдвигом во времени и уменьшением по амплитуде. Это устройство имеет кольцевой носитель *К* (рис. 9.8, *а*) в виде магнитной ленты или диска с магнитным слоем на торце, на котором головкой *ГЗ* записывается сигнал. Головки *ГВ*, последовательно считывая этот сигнал, создают его повторения. После прохождения пленки у головки стирания она может принять новый сигнал. Нужное затухание повторных сигналов создается переменными сопротивлениями R_1—R_4. Так как воспроизводящие головки имитируют несколько первых отражений, то завершающий этап реверберационного процесса создается за счет обратной связи последней из них с усилителем записи. В итоге за первой группой сигналов возникает вторая, третья и т. д. (см. рис. 9.8, *б*).

Магнитные ревербераторы являются ревербераторами электроакустического типа и моделируют одномерную акустическую систему, для которой, судя по формуле (9.7), время задержки Δt определяется отношением:

$$\Delta t = \frac{n_x}{f_n} = \frac{L}{c}\,.$$

В этом случае L соответствует расстоянию между головками воспроизведения, а c — скорости звуконосителя. Следовательно, разумно выбирая эти параметры, можно управлять структурой ранних отражений и создавать условия, характерные для помещений больших объемов. Но, в отличие от таких помещений, последующие «отраженные» сигналы, обусловленные обратной связью, не уплотняются, а многократно повторяют структуру начального этапа реверберационного процесса. Эта связь, так же как и при звукоусилении [15], приводит к тому, что прямые сигналы u_0, принятые головками, и их повторения u_φ имеют сдвиг по фазе на угол $\varphi = 2\pi f\Delta t$. Уровень самого сигнала в этом случае выражается суммой:

$$|N| = |\Delta N| + 20\lg\frac{\beta}{\sqrt{1+\beta^2+2\beta\cos\varphi}}, \qquad (9.22)$$

где ΔN — постоянная составляющая сигнала, а $\beta = \frac{u_\varphi}{u_0}$ — коэффициент обратной акустической связи. При изменении частоты f сигнала угол φ может принимать значения в пределах от $2n\pi$ до $(2n-1)\pi$, а уровень сигнала — соответственно в пределах от

$$\left.\begin{aligned} |N'| &= |\Delta N| + 20\lg\frac{\beta}{1-\beta} \\ \text{до}\quad |N''| &= |\Delta N| + 20\lg\frac{\beta}{1+\beta}, \end{aligned}\right\} \qquad (9.23)$$

т. е. будет то возрастать, то падать. Это означает, что изменение частоты приводит к возникновению то положительной, то отрицательной обратной связи, вследствие чего частотная характеристика становится неравномерной. Эта неравномерность на основании выражений (9.23) представится в виде:

$$|N'| - |N''| = 20\lg\frac{\beta}{1-\beta} - 20\lg\frac{\beta}{1+\beta} = 20\lg\frac{1+\beta}{1-\beta} \qquad (9.24)$$

и, как следует из рис. 9.9, *а*, построенного по этой формуле, будет быстро расти при увеличении β. Это придает реверберации заметную окраску и приводит к опасности самовозбуждения системы. Уменьшить влияние обоих недостатков можно, уменьшая амплитуду повторного сигнала u_φ по сравнению с сигналом, принятым головкой u_0, что достижимо при условии увеличения числа головок воспроизведения.

Если с помощью сопротивлений R_1, R_2 и т. д. на выходе магнитного ревербератора (см. рис. 9.8) пропорционально менять соотношение уровней сигналов, поступающих с головок воспроизведения, можно изменить крутизну их затухания ΔN или время реверберации $T_{ис}$. Величина вносимого затухания определяется по отношению:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{60}{T_{ис}}, \text{ как } \Delta N = \frac{60}{T_{ис}} \Delta t,$$

а время искусственной реверберации, как

$$T_{ис} = \frac{60}{\Delta N} \Delta t. \qquad (9.25)$$

Это выражение показывает, что, зная время задержки Δt, можно найти, при каком затухании ΔN получается нужное время реверберации $T_{ис}$. Этот метод управления реверберации практически реализуется просто, что является одним из достоинств ревербератора данного типа. Вместе с тем нужно помнить, что чрезмерное увеличение $T_{ис}$ (уменьшение ΔN) нежелательно, так как оно сопряжено с увеличением коэффициента обратной связи β и заметным ухудшением искусственной реверберации. Другими достоинствами этого ревербератора являются возможность получения таких же временны́х задержек, как и для больших помещений, и использование затухания сигналов для управления $T_{ис}$.

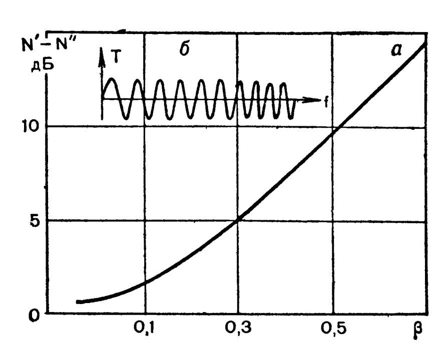


Рис. 9.9. Зависимость коэффициента обратной акустической связи (β) от разности уровней сигналов (*а*) и влияние β на частотную характеристику (*б*)

Недостатки ревербератора выражаются в следующем:

1. Временно́й спектр на заключительном этапе не уплотняется, как это имеет место при создании естественной реверберации.

2. Частотная характеристика времени реверберации имеет подъемы и спады, влияющие на тембральную окраску реверберационного процесса.

3. Обратная связь при малом числе головок воспроизведения или при большом времени $T_{ис}$ может привести к самовозбуждению системы.

Нужно отметить достаточно высокие технические параметры современных ревербераторов этого типа. Например, ревербератор МЭЗ-45 имеет девять головок воспроизведения, для которых при скорости движения звуконосителя $c=76$ см/с время задержки Δt лежит в пределах 25—260 мс. Частотная характеристика времени реверберации от 70 до 12 000 Гц при величине частотных искажений не более 2,5 дБ. Пределы управления реверберацией от 1 до 5 с, уровень помех ниже — 56 дБ.

9.7. Амбиофоническая система

Из рассмотрения ревербераторов различного типа следует, что создаваемый каждым из них реверберационный процесс тождествен естественному только по некоторым параметрам. Так, гулкая камера, листовой и пружинный ревербераторы создают близкий к естественному временной спектр на заключительном этапе затухания,

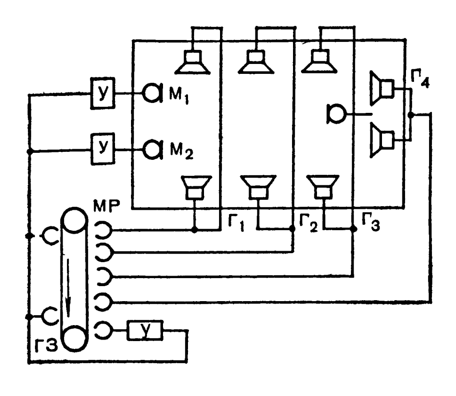


Рис. 9.10. Схема амбиофонической системы: *МР* — магнитный ревербератор

Рис. 9.11. Частотные характеристики реверберации, полученные путем изменения крутизны кривой затухания *(2, 3, 4)* и обратной акустической связи *(5, 6)*

тогда как магнитный ревербератор позволяет получить такой же спектр только на начальном этапе. Отсюда понятно, что магнитный ревербератор в комбинации с любым ревербератором колебательного типа может заметно повысить качество искусственной реверберации.

Еще более высококачественной является комбинация магнитного ревербератора со стационарной электроакустической установкой, составляющая вместе так называемую *амбиофоническую систему*. Электрическая схема этой системы приведена на рис. 9.10. На ней показаны микрофоны M_1 и M_2, установленные в помещении для звукопередачи и подключенные к магнитному ревербератору *МР*. Запаздывающие сигналы от каждой головки воспроизведения *ГВ* ревербератора после усиления поступают к определенной группе громкоговорителей $Г_1$, $Г_2$ и т. д., расположенных в помещении так, чтобы временные задержки, созданные ревербератором и громкоговорителями, были бы близки к реальным запаздываниям отраженных сигналов в данном помещении. Последняя головка воспроизведения $ГВ_5$ используется для создания повторных групп запаздывающих сигналов с помощью обратной электрической связи.

Нужно помнить, что кроме электрической в системе возникает акустическая обратная связь, так как на микрофоны, подключенные к входу системы, будут поступать по-разному запаздывающие сигналы от громкоговорителей. Для уменьшения этой связи и исключения возможности самовозбуждения установки указанные микрофоны выбираются с обостренной характеристикой направленности.

Согласно выражению (9.1) и рис. 9.2, подмешивание искусственной реверберации будет эффективным только тогда, когда результирующая реверберация определяется действием ревербератора. Учитывая это, для управления временем реверберации в данной системе кроме двух уже известных может использоваться третий способ, связанный с изменением величины обратной акустической связи.

Результаты применения этих способов управления можно видеть по кривым рис. 9.11. Кривая *1* на нем выражает зависимость времени реверберации самой студии от частоты; кривые *2*, *3* и *4* показывают, как возрастает $T_{р}$, если $T_{ис}$, полученное путем изменения крутизны кривой затухания, было соответственно равным 1, 2 и 3 с, и кривые *5* и *6* показывают увеличение времени реверберации, обусловленное коэффициентом обратной акустической связи при значениях $T_{ис}$ равных 1 и 2 с. Нужно только помнить, что последним методом управления следует пользоваться с осторожностью, выбирая коэффициент обратной связи в пределах устойчивой работы системы.

Так как имитируемые магнитным ревербератором отраженные сигналы передаются рассредоточенными в помещении громкоговорителями, к слушателям они будут приходить с разных сторон. Это придает амбиофонической системе новое качество — созданная ею искусственная реверберация становится пространственной, еще больше приближаясь к естественной, воспринимаемой при непосредственном слушании.

Следовательно, амбиофоническая система кроме того, что расширяет возможности управления временем реверберации и создает условия для управления структурой ранних отражений, делает искусственную реверберацию еще и пространственной.

Указанные особенности амбиофонической системы находят наиболее полное использование в студиях, передача из которых ведется в присутствии публики или в больших залах многоцелевого назначения. Все они как нельзя лучше отвечают требованиям к системе искусственной реверберации для стереофонических передач. В этом случае микрофоны размещаются в студии соответственно требованиям к стереопередачам.

В заключение можно отметить, что магнитный ревербератор МЭЗ-45 отечественного производства имеет в своем составе специальный блок для его работы в амбиофоническом режиме. В отечественных установках КЗТУ-1 и КЗТУ-3, предназначенных для управления звуковыми процессами в залах многоцелевого назначения, также предусмотрена возможность использования магнитного ревербератора с амбиофонической системой или гулкой камерой.

9.8. Электронные ревербераторы

Временные сдвиги между сигналами, имитирующими отражения, из которых складывается реверберационный процесс, можно получить с помощью электрических линий задержки. Эти линии собирают в группы, состоящие более чем из 1000 элементов. Каждая

группа позволяет получить сдвиги во времени до 30 мс ступенями через 5 мс. Увеличивая число групп, можно создать систему, используемую в качестве ревербератора или хотя бы в качестве приставки к одной из существующих систем искусственной реверберации. Расширить временной спектр такого устройства позволяет включение отдельных его элементов в цепь обратной связи. Большое количество групп и ступеней временно́й задержки сигнала, возможности регулировки обратной связи позволяют составить любой набор задержек, отвечающий временно́му спектру данного помещения или вида передачи. Таких наборов должно быть так много, чтобы путем переключения получить оптимальный для данной передачи временно́й спектр, а управляя уровнями запаздывающих сигналов, получить оптимальное время реверберации.

Возможности электронного ревербератора могут быть еще больше расширены, если заранее составить схемы переключений отдельных звеньев устройства, позволяющие получить реверберационный процесс с оптимальными параметрами не только для монофонических, но и для стереофонических и квадрафонических систем, для отдельных инструментов или групп инструментов, участвующих в музыкальной передаче.

Обилие возможных вариантов получения искусственной реверберации или начального ее этапа при использовании только электронной приставки, большое их разнообразие по временно́му спектру заставляют уделять бо́льшое внимание составлению программ переключения элементов устройства, а при выборе нужной программы пользоваться специальной счетнорешающей системой.

9.9. Сравнительная оценка качества искусственной реверберации, получаемой различными методами

Хотя существующие типы ревербераторов имеют достаточно полные объективные характеристики, наиболее точное сравнение их по качеству искусственной реверберации можно осуществить только по результатам субъективных испытаний.

Такие испытания были проведены нами в условиях киностудии «Ленфильм» применительно к гулкой камере ($V=100$ м^3), листовому ревербератору типа ЕМТ-2 и пружинному ревербератору типа ПР-2. Отобранные в фильмотеке студии отрывки речевых и музыкальных записей были перезаписаны на пленку с наложением искусственной реверберации и без нее. Время искусственной реверберации менялось в пределах, предусмотренных регулировкой для каждого из ревербераторов, а время естественной реверберации для исходных записей было близким к оптимуму и для речи составляло $0{,}5 \div 0{,}7$ с, для пения и эстрадной музыки — около 1 с, для симфонической и органной музыки — соответственно 1,5 и $1{,}8 \div 2$ с. Прослушивание и оценка качества звучания производились в «жилой» комнате с участием 20 экспертов.

Кривые заметности изменения качества искусственной реверберации, полученные по результатам опыта для названных ревербераторов, приведены на рис. 9.12 (для речевой и вокальной программ) и на рис. 9.13 (для музыкальных программ). На первом из них видно, что полученные для женского голоса в режиме

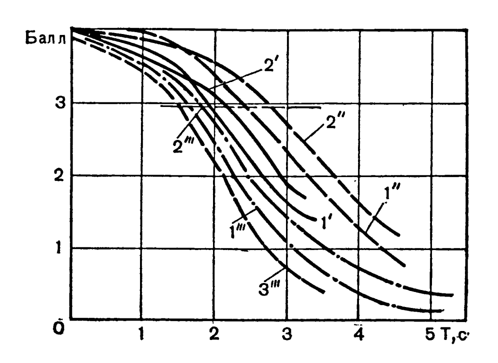


Рис. 9.12. Качество искусственной реверберации, создаваемой гулкой камерой (1', 2'), листовым (1'', 2'') и пружинным (1''', 2''') ревербераторами при речевых и вокальных программах

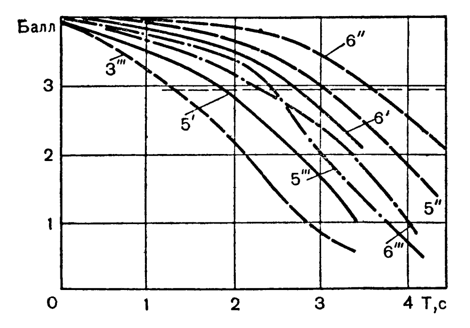


Рис. 9.13. Качество искусственной реверберации, создаваемой гулкой камерой, листовым и пружинным ревербераторами для эстрадного оркестра (5', 5'', 5''') и органа (6', 6'', 6''')

речи кривая 1'' и для того же голоса, но в режиме пения кривая 2'', относящиеся к листовому ревербератору, лежат выше кривых 1' 2', полученных в тех же режимах, но для гулкой камеры. Ниже их располагаются подобные кривые (1''', 2''') для пружинного ревербератора. Отсюда следует, что меньше всего на качестве передачи звучания голоса сказывается применение листового и больше — применение пружинного ревербератора. Помимо этого, кривые, соответствующие речевым звучаниям, располагаются на графике ниже кривых для пения, а для мужского голоса (кривая 3''') в основном ниже, чем для голоса женского (кривая 1'''). Это обнаруживается для всех ревербераторов, что указывает на зависимость заметности измене-

ния качества реверберации не только от типа ревербератора, но и от вида голоса и характера звуковой программы.

На рис. 9.13 кривые *5* и *6* характеризуют заметность искусственной реверберации при звучании эстрадного оркестра и органа. Номера с одним штрихом означают, что кривая получена при использовании гулкой камеры, с двумя — при применении листового и с тремя — пружинного ревербератора. Как и в случае речевых про-

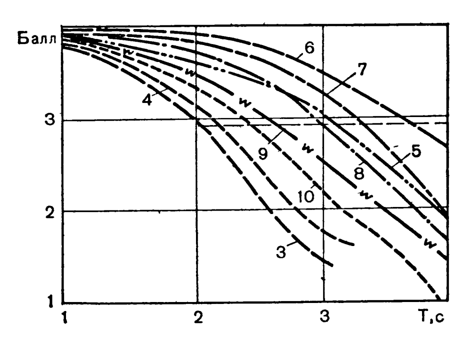


Рис. 9.14. Качество искусственной реверберации для листового ревербератора при звучании органа (*6*), органа с оркестром (*7*), симфонического (*8*), духового (*9*) и танцевального (*10*) оркестров

грамм, наибольшее снижение качества искусственной реверберации обнаруживается при работе пружинного и наименьшее — при применении листового ревербератора, особенно в случае, относящемся к передаче органной музыки. Таким образом, почти для всех видов программ лучшие результаты показал листовой ревербератор, чуть хуже — гулкая камера и самые плохие — пружинный ревербератор. Гулкая камера оказалась на втором месте, вероятно, в связи с ее очень малым объемом. Относительное изменение оценок, выставляемых каждым из экспертов в процессе прослушивания, они объясняли изменением тембра звучания, наличием призвуков и колебаниями уровня шума.

На рис. 9.14 показана зависимость изменения качества искусственной реверберации от вида звуковой программы для листового ревербератора. Обозначения кривых *3*, *5* и *6* на этом рисунке те же, что и на рис. 9.12 и 9.13; кривые же *7*, 8, *9* и *10* отвечают органу с оркестром, симфоническому и духовому оркестрам и современной танцевальной музыке. Для всех этих кривых обнаруживается, что самое большое изменение их крутизны, связанное с ухудшением искусственной реверберации, происходит при численном ее изменении в пределах от 1,5 до 2,5÷3 с, т. е. когда роль естественной реверберации становится ничтожной. Судя по этой крутизне, наименьшее влияние искусственной реверберации на качество звучания обнаруживается при передачах органной музыки (кривая *6*), потом оно возрастает при переходе к передачам симфонической, духовой, современной музыки (кривые *8*, *9* и *10*), мужского пения и речи (кри-

вые *4, 3*). Такая последовательность позволяет связать ее с увеличением темпа звучания. Заметность искусственной реверберации, будучи малой при звучании медленной музыки, возрастает по мере ее ускорения. Особенно она велика при речевых передачах.

Сравнивая на рис. 9.14 кривые для инструментальной музыки с кривыми для речи и пения, можно заметить, что последние из них при увеличении времени искусственной реверберации до 1,5÷2,0 с снижаются даже менее круто, чем первые, а потом, при дальнейшем увеличении $T_{\text{ис}}$, крутизна их падения все больше возрастает. Здесь, по-видимому, кроме недостатков искусственной реверберации начинает сказываться все большее снижение разборчивости речи.

Как можно судить по пунктирным прямым, проведенным на рис. 9.12 и 9.13, сохраняя условия, когда внесение искусственной реверберации еще едва заметно (балл 3) для листового ревербератора, ее значение при передачах мужской и женской речи и пения, симфонической, духовой, эстрадной и органной музыки может предельно изменяться соответственно до 1,5; 1,7; 2,2; 2,4; 2,9; 2,5; 2,9 и 3,7 с. Примерно те же предельные значения искусственной реверберации могут быть сохранены и при применении гулкой камеры. В случае пружинного ревербератора указанные значения должны быть снижены до 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 1,8; 1,7 и 2,6 с.

Итак, можно отметить следующее:

1. Высокое качество искусственной реверберации обеспечивается при использовании листового ревербератора или гулкой камеры. При работе с пружинным ревербератором это качество заметно снижается.

2. Заметность искусственной реверберации зависит от вида звуковой программы. Она обнаруживается слухом тем раньше, чем выше темп исполняемого музыкального произведения или скорость речи.

3. Для каждого из типов ревербераторов и вида звуковой программы существует предельное значение $T_{\text{ис}}$, за которым недостатки искусственной реверберации становятся заметными на слух.

9.10. Рекомендации по использованию ревербераторов

Как видно из материалов данной главы, возможности управления искусственной реверберацией по сравнению с естественной значительно больше, а сами способы управления проще. Однако, пользуясь различными методами создания искусственной реверберации, нельзя забывать, что эти методы связаны с возникновением искажений реверберационного процесса, часто хорошо заметных на слух.

Звукорежиссеры прибегают к помощи ревербераторов прежде всего в случае, когда для высококачественной передачи звучания требуется большее время реверберации, чем то, которое можно получить в данном помещении. Удобно пользоваться ревербераторами и тогда, когда в одном и том же помещении приходится проводить запись программ различного вида. Кроме того, при плохих акустиче-

ских условиях в помещении или в случае, когда объем помещения недостаточен для записи звучаний большого ансамбля, звукорежиссеру приходится размещать микрофоны слишком близко к исполнителям. Это приводит к заметному снижению эквивалентной реверберации, для компенсации которой следует прибегать к помощи ревербератора.

Иногда искусственную реверберацию используют для устранения недостатков, свойственных некоторым источникам звука. У ряда таких инструментов, как скрипка, флейта и особенно флейта-пикколо, на высоких тонах, лишенных гармоник, звучание получается резким, пронзительным и плохо воспринимается на слух. Подмешивание искусственной реверберации в этом случае смягчает, облагораживает звучание. Тот же прием делает менее резкими звучания скрипки и контрабаса в момент атаки и ударных инструментов в момент удара.

Как отмечалось выше, для солирующих инструментов и певцов обычно используются отдельные микрофоны. Это позволяет подчеркнуть их звучание не только путем увеличения уровня сигнала, но и путем увеличения времени реверберации в каналах, работающих на солистов.

Ревербераторами рекомендуется пользоваться также и в целях повышения художественного качества передач. Так, чтобы добиться совпадения зрительного и звукового впечатления, нужно звучания, сопровождающие на экране кадры с изображениями таких помещений, как крытые стадионы, рынки, цехи заводов, подавать с повышенным временем реверберации. Такое же время реверберации необходимо и при переходе от крупного масштаба к мелкому масштабу изображения источника звука на экране.

Постепенное изменение искусственной реверберации позволяет создавать звуковую перспективу в кадрах, в которых источник звучания перемещается по глубине. Искусственную реверберацию можно использовать и для создания звуковых фонов в случае, когда в пределах одного кадра имеются различно удаленные источники звука. Для этого ревербераторы включаются в каналы с микрофонами, принимающими сигналы от наиболее удаленных источников. Нужно иметь в виду, что для создания эффекта разноплановости звучания необходимо одновременно с изменением реверберации изменять также тембр и уровни сигналов, создаваемых по разному удаленными источниками.

Следует отметить, что, хотя инструменты симфонического оркестра по глубине достаточно разнесены, к разноплановости их звучания обычно не стремятся. Соблюдение единства звуковой перспективы оправдывается тем, что наилучшее восприятие звучания симфонического оркестра получается при относительно большом расстоянии от него, когда эти перспективные различия не обнаруживаются слухом.

Зато искусственной реверберацией широко пользуются для повышения художественной выразительности звучания в эстрадной и современной популярной музыке. С ее помощью создают многопла-

новость звучания инструментов ансамблей, которая может меняться в процессе исполнения одного и того же музыкального произведения. Подчеркнутость ритмического рисунка произведения создается ритм-группой при малом времени реверберации, тогда как звучание мелодических групп, особенно солирующих, обычно подается с меньшей четкостью и большей реверберацией. Часто одни и те же инструменты (например, фортепиано, гитара) выполняют функции то ритмического, то мелодического характера с соответствующим изменением времени реверберации. Кроме искусственной реверберации, создаваемой ревербераторами, часто используют реверберационный эффект самих инструментов. Для увеличения длительности слышимого затухания звуков фортепиано, гитары, барабанов микрофоны помещают внутри самого инструмента или вблизи излучающих звук элементов.

Указанные приемы управления искусственной реверберацией не являются обязательными или исчерпывающими. Часто их применение зависит от опыта и вкуса звукорежиссера, его понимания музыкального произведения, от связи музыки с характером изобразительного материала.

Что же касается методов управления искусственной реверберацией, то следует помнить, что они неравноценны. Способ изменения крутизны кривой затухания можно рекомендовать при условии, что реверберационное устройство обеспечивает необходимую или близкую к ней структуру ранних отражений, например при использовании комбинированных ревербераторов, у которых начальный этап затухания создается с помощью магнитной приставки. Метод относительного изменения реверберирующего и прямого сигналов дает лучшие результаты в случае, когда временной спектр ревербератора уплотнен в начале процесса (см. параграф 9.2). К числу таких ревербераторов относится листовой и пружинный, а также гулкая камера. Очевидно, эти ревербераторы более пригодны для речевых передач.

Как показали опыты (см. параграф 9.10), для каждого вида ревербератора существует предельное время реверберации, начиная с которого орган слуха не обнаруживает вносимые системой искажения. Это время зависит также и от вида звуковой программы. Учитывая это, при использовании гулкой камеры, листового и пружинного ревербераторов изменение времени реверберации допустимо производить соответственно в пределах не более 3,7; 3,2 и 2,6 с — при передаче органной музыки; 2,9; 2,7 и 1,8 с — симфонической музыки; 2,5; 2,3 и 1,8 с — духовой музыки; 2,9, 2, и 1,7 с — эстрадной музыки;2,2; 2,0 и 1,4 с — при пении; 1,7; 1,5 и 1,2 с — при речевых передачах.

Глава 10.
АНАЛИЗ СТЕРЕОФОНИЧЕСКИХ СИСТЕМ И УСЛОВИЙ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

10.1. Принципиальные основы стереофонии

Даже лучшие монофонические системы не могут передать пространственную звуковую картину, характерную для естественного приема звучаний. Для передачи пространственного положения и перемещения источников звука должна быть использована стереофоническая система. Она позволяет не только приблизить звукопередачу к натуральной, взаимно увязать зрительную и звуковую информацию, но и, управляя пространственными параметрами сигнала, создавать новые звуковые эффекты.

Стереофоническими системами звукопередачи называют системы, способные воссоздавать пространственно-временные признаки, характерные для восприятия естественных источников звука. Такими признаками являются направление прихода сигнала (прямого или отраженного) и различия в уровнях громкости, в частотном составе и во времени эквивалентной реверберации для звучаний, идущих от источников, по разному удаленных от каждого микрофона. Эти признаки привносят в передачи ряд важных особенностей. Они: а) передают пространственное положение одиночных источников звука и их относительное перемещение по фронту и по глубине; б) позволяют судить о размерах источников (оркестра, хора); в) повышают прозрачность звучания, выделяя в ансамбле отдельные музыкальные группы или инструменты; г) придают объемность и бо́льшую естественность реверберационному процессу, передаваемому из первичного помещения; д) связывают исходные звучания с размерами первичного помещения, обогащая их тембр, приближая условия приема стереофонической передачи к условиям непосредственного восприятия звучаний.

Главный пространственно-слуховой признак, определяющий особенности стереофонических передач, — это *направление прихода сигнала* к слушателю. Зная его, можно найти пространственное положение каждого из разрозненных источников звука, а по его изменению — обнаружить их взаимное перемещение. По направлению на крайние точки группового источника или на его внутренние элементы легко определить размеры источника и выделить в нем звучания отдельных инструментальных групп. Разнообразие в направлениях прихода первых отражений реверберационного процесса придает звучанию естественную объемность, характерную для непосредственного слушания в помещении.

Таким образом, для создания пространственной картины при передаче звучаний из первичного помещения во вторичное необходимо,

чтобы стереофоническая система создавала изменения таких физических параметров, которые позволяли бы слуху выделять по направлению любой из источников. Источники, искусственно разделенные системой в нашем восприятии, называются *кажущимися*, а способность слуха разделять их по направлению — *локализационной* способностью слуха.

Как показали опыты К. де Боера, автора и других исследователей, факторами, позволяющими локализовать кажущийся источник звука

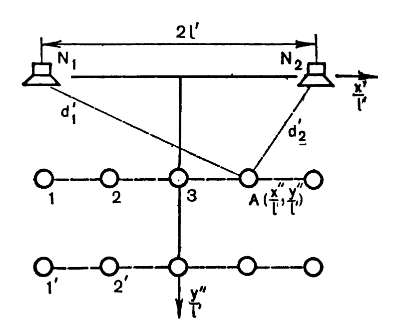


Рис. 10.1. Схема размещения слушателей (*1*, *1'*, *2*, *2'*) перед громкоговорителями двухканальной стереофонической системы

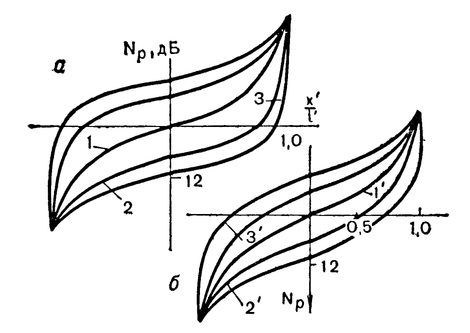


Рис. 10.2. Кривые зависимости перемещения КИЗ x'/y' от разности уровней сигналов ($N_р$), создаваемых стереофонической системой при различном смещении слушателей по оси X и Y

в пределах между крайними громкоговорителями системы (рис. 10.1), являются разность уровней $N_р$ интенсивностей сигналов, передаваемых по каждому каналу, и разность во времени $\Delta\tau$ прихода их к каждому слушателю (1, 2, 3 и т. д.). Положение кажущегося источника (КИЗ) зависит также от числа каналов системы, направленности громкоговорителей и положения слушателей $\left(\frac{x''}{l'}, \frac{y''}{l'}\right)$ относительно звуковоспроизводящей системы (рис. 10.1).

Как можно убедиться [16], при рассмотрении семейств экспериментальных кривых (рис. 10.2, *а* и *б*), построенных соответственно для случаев размещения слушателей на расстояниях $\frac{y''}{l'} = 2$ и $\frac{y''}{l'} = 4$ от линии громкоговорителей, равномерному изменению разности уровней $N_р$ отвечает сначала медленное, а потом все ускоряющееся перемещение. КИЗ к точкам $\frac{x'}{l'} = \pm 1$, в которых размещаются громкоговорители системы. Для того чтобы КИЗ прошел весь путь между громкоговорителями, равный $2l'$, необходимо, чтобы разность уровней $N_р$ изменялась в пределах от 0 до $\pm 20 \div 24$ дБ. Для слушателей, расположенных на оси системы $\left(\frac{x''}{l'} = 0\right)$, движение КИЗ (кривые *1* и *1'*) происходит равномернее, чем для слу-

шателей, смещенных в сторону от оси на расстояние $\frac{y''}{l'}$, равное $\pm 0{,}5$ или $\pm 1{,}0$ (кривые *2* и *2'*, *3* и *3'*). При смещении вправо от оси (нижние кривые) движение КИЗ слева направо происходит сначала медленно, а потом, за осевой линией, — очень быстро. Для слушателей, сидящих слева от оси (верхние кривые), такое же изменение скорости КИЗ будет при его движении в обратном направлении. Относительное смещение, различная крутизна участков одной и той же кривой или разных кривых (см. рис. 10.2) указывают на то, что при равномерном изменении $N_р$ нельзя обеспечить одинаковую локализацию и скорость движения КИЗ ни в восприятии одного, ни одновременно в восприятии нескольких слушателей, сидящих в одном или в разных рядах. Вместе с этим, когда звуковая информация, передаваемая стереофонической системой, связывается со зрительной, например в условиях кинопоказа, то последняя в состоянии осуществить значительную «коррекцию». Как показывают опыты [21, 22], звуковой образ может сливаться со зрительным при различии в положении их на линии громкоговорителей до $\frac{x'}{l'} = 0{,}5$.

Нужно иметь в виду, что различие в положении КИЗ при его приеме слушателями в точках, лежащих в стороне от оси системы, обусловлено разностью $\Delta\tau$ во времени прихода сигналов от громкоговорителей в точку приема. Как видно из рис. 10.1, эта разность

$$\Delta\tau = \frac{d_1' - d_2'}{c_0},$$

где d_1' и d_2' — расстояния от слушателя до каждого из громкоговорителей системы. Изменение только $\Delta\tau$ в небольших пределах от 0 до нескольких миллисекунд приводит к перемещению КИЗ в пределах полубазы между громкоговорителями. Отсюда следует, что кривые на рис. 10.2. выражают собой субъективно найденную зависимость положения КИЗ от двух физических параметров системы — $N_р$ и $\Delta\tau$. Каждая из этих зависимостей далека от линейной, что заметным образом усложняет построение стереофонических систем.

В связи с этим, очевидно, наиважнейшим для стереофонических систем является требование о таком изменении одного или одновременно двух ее физических параметров — $N_р$ и $\Delta\tau$, при котором соблюдалось бы возможно большее подобие в положении и перемещении КИЗ и действительного источника звука соответственно во вторичном и первичном помещениях. Это требование относится к каждому из источников, если их несколько.

10.2. Классификация стереофонических систем

Стремление удовлетворить требование о соответствии локализационных характеристик КИЗ и действительных источников звука привело к созданию ряда стереофонических систем. Их можно разделить на группы: по структуре построения системы, по типу и

размещению микрофонов, используемых в ней, и по числу раздельных каналов.

По структуре построения системы можно разделить на собственно стереофонические, псевдостереофонические и квазистереофонические.

Собственно *стереофонические системы* (рис. 10.3, *а*) предполагают передачу звуковой информации из первичного помещения во

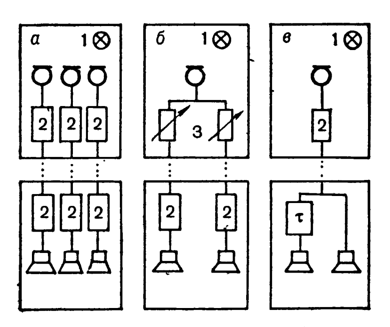


Рис. 10.3. Схемы стереофонической (*а*), псевдостереофонической (*б*) и квазистереофонической (*в*) систем; *2* — усилители; *3* — регуляторы уровней

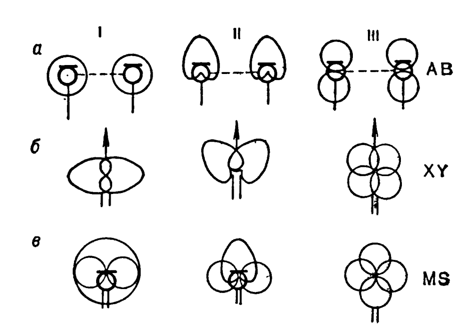


Рис. 10.4. Варианты стереофонических систем типа *AB*, *XY* и *MS*

вторичное по двум и более каналам, при любом количестве приемников на входе и излучателей на выходе каждого из каналов. Управление сигналами проводится на входной стороне и может быть предварительным (путем выбора и размещения микрофонов) или последующим (с помощью регулировок). Для одних (системы *АВ*) управление ограничено и может осуществляться только одновременно по всем каналам, в других (системы *MS* и *ХУ*) возможно и раздельное по каналам управление сигналами.

Псевдостереофонические системы (рис. 10.3, *б*) имеют ту особенность, что сложный сигнал на стороне входа записывается или передается по одному каналу, а на стороне выхода разделяется на несколько каналов, сигналы в которых, сохраняя свою форму, отличаются только по уровням. Управление уровнями сигналов в каналах можно осуществлять автоматически специально записанным управляющим сигналом или вручную, пользуясь для этого панорамным регулятором.

Квазистереофонические системы (см. рис. 10.3, *в*), как и предыдущие, отличаются от собственно стереофонических тем, что разделение и управление разделенными сигналами у них проводится на выходной стороне. Вместе с тем эти системы непохожи на псевдостереофонические, так как разделенные сигналы имеют не только изменяющиеся уровни, но и неодинаковы по форме. В одних случаях это различие формы обусловлено прохождением одного из разделенных сигналов через ревербератор, в другом — подключением к дополнительным каналам линии задержки с отличающимися временны́ми сдвигами (τ).

По типу и размещению микрофонов собственно стереофонические системы делятся на системы типа *AB*, *XY*, *MS* и смешанные.

Стереофоническая система AB, являясь классической многоканальной, состоит из ряда микрофонов одинаковой чувствительности и направленности, включаемых на каждый из каналов по одному и более. Микрофоны устанавливают вдоль фронта ансамбля по прямой или ломаной линии, на некотором расстоянии друг от друга, причем так, чтобы каждый канал работал на свою зону. Акустические оси микрофонов могут быть параллельными или произвольно развернутыми. Системы, у которых микрофоны размещаются по углам четырехугольника, относясь по существу к типу *AB*, обычно называются *квадрафоническими.*

Смещение микрофонов и их различное угловое положение относительно источников звука приводит к тому, что для каждого сигнала в цепи соседних каналов создаются отличающиеся по величине интенсивности и временные сдвиги. Стереоэффект в этой системе создается при воздействии двух физических факторов — $N_р$ и $\Delta\tau$.

Для системы *AB* возможны три основных варианта, показанные на рис. 10.4, *а*.

Стереофоническая система XY, так же как и система *AB*, состоит из однотипных по направленности микрофонов, которые располагаются вблизи друг друга на одной вертикальной оси (совмещенные микрофоны). Их акустические оси в горизонтальной плоскости располагаются симметрично оси системы и повернуты относительно последней на угол π или $\frac{\pi}{2}$ (см. рис. 10.4, *б*), создавая при этом три основных варианта (*I*, *II* и *III*). Каждый из микрофонов работает на отдельный канал. В отличие от системы *AB* эта система совмещенных микрофонов имеет только два канала и позволяет создавать только интенсивностный стереофонический эффект.

Стереофоническая система MS состоит также из двух совмещенных микрофонов. Один имеет любую из трех основных характеристик направленности, другой — характеристику только косинусоидального типа (см. рис. 10.4, *в*). Таким образом, и для этой двухканальной системы существует три варианта получения интенсивного стереофонического эффекта. Особенность ее выражается в том, что принятые микрофонами сигналы подаются в один канал после их сложения, а в другой — после вычитания. Сложение сигналов, принимаемых первым (информация *M*) и вторым (информация *S*) микрофонами при различных углах приема, соответствует сложению их характеристик направленности, что для *I* и *III* вариантов системы *MS* приводит к получению таких же характеристик, как у правого микрофона *X* тех же вариантов системы *XY*. Вычитание сигналов приводит к характеристикам направленности левого микрофона *Y* для указанных вариантов. Следовательно, благодаря сложению и вычитанию сигналов в системе *MS* ее варианты становятся тождественными соответствующим вариантам системы *XY*. Так, второй вариант системы *MS* соответствует варианту системы *XY*, составленному из микрофонов, имеющих характеристики типа супер-

кардиоиды, развернутые вправо *(X)* и влево *(У)* на угол $\theta = 120°$.

Преобразование системы *MS* в систему *XУ*, имеющее и обратную силу, принято выражать следующими равенствами:

$$M + S = X; \quad M - S = Y \text{ и } X + Y = M; \quad X - Y = S. \quad (10.1)$$

Важно и то, что, изменяя осевую чувствительность одного из стереомикрофонов в ту или другую сторону относительно чувствительности другого, можно получить ряд промежуточных вариантов для систем *MS* и *XУ*. Таким образом, применение их, особенно при наличии устройств для дистанционного управления характеристиками направленности и чувствительностью, позволяет легко осуществлять выбор системы и ее варианта, наиболее отвечающих условиям передачи.

Последующий анализ стереофонических систем выполнен по результатам исследований автора.

10.3. Искажения в передаче движения кажущегося источника звука по глубине

Идеальная стереофоническая система должна передавать во вторичное помещение пространственную картину, в которой положение отдельных КИЗ или их перемещение как по глубине, так и по фронту воспринималось бы слушателями в полном соответствии с положением или движением действительного источника звука в первичном помещении. Для этого как минимум требуется, чтобы при равномерном движении действительного источника вдоль нормали к оси системы в пределах между осями крайних микрофонов КИЗ совершал бы равномерное движение по прямой между крайними громкоговорителями воспроизводящей системы. Это, очевидно, возможно только при условии, что суммарный уровень N_c сигнала при воспроизведении будет оставаться постоянным, а разность уровней N_p — изменяться в соответствии с кривыми на рис. 10.2, *а* или 10.2, *б* и в зависимости от размещения слушателей в том или ином ряду зала для прослушивания.

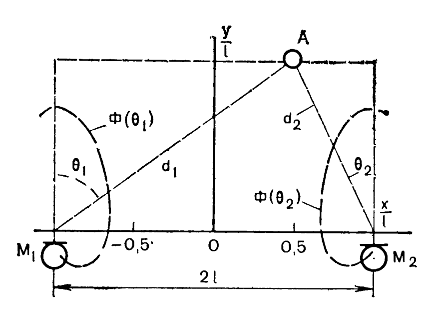


Рис. 10.5. Схема для определения суммарного уровня сигнала, создаваемого стереосистемой *АВ*

Система *АВ*. Следует выяснить, как выполняется требование относительно суммарного уровня N_c сигнала, передаваемого системой этого типа при перемещении исполнителя параллельно линии микрофонов [5].

Как видно из рис. 10.5, сила, действующая на подвижную систему каждого микрофона, будет зависеть от их характеристик направленности $\Phi(\theta)$, углов приема звуковой волны θ_1 и θ_2, а также

от расстояния d_1 и d_2 между исполнителем и каждым из микрофонов. Эти силы могут быть выражены равенствами:

$$F_1 = p_0 \Phi(\theta_1) \frac{y}{d_1} = p_0 \Phi(\theta_1) \cos \theta_1; \qquad (10.2а)$$

$$F_2 = p_0 \varphi(\theta_2) \frac{y}{d_2} = p_0 \Phi(\theta_2) \cos \theta_2, \qquad (10.2б)$$

где p_0 — звуковое давление, создаваемое источником звука при его размещении на оси микрофона.

Считая коэффициенты усиления каналов, так же как и чувствительности микрофонов и громкоговорителей системы, одинаковыми, что является обязательным для системы *АВ*, можно представить звуковые давления, развиваемые громкоговорителями на выходе, в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p_0 \Phi(\theta_1) \Phi'(\theta_1') \cos \theta_1 \cos \theta_1'; \\ p_2 &= p_0 \Phi(\theta_2) \Phi'(\theta_2') \cos \theta_2 \cos \theta_2', \end{aligned} \right\} \qquad (10.3)$$

где $\Phi'(\theta')$ — характеристика направленности громкоговорителей; θ_1' и θ_2' — углы приема сигналов слушателями.

Если учесть, что при восприятии стереопередач слушатели неподвижны, т. е. для каждого из них углы приема θ_1 и θ'_2 постоянны, то выражение для воспринимаемой ими энергии можно написать так:

$$E_c = k p_c^2 = k(p_1^2 + p_2^2) = p_0^2 [\Phi^2(\theta_1) \cos^2 \theta_1 + \Phi^2(\theta_2) \cos^2 \theta_2].$$

В этом случае относительное изменение уровня суммарного сигнала при перемещении источника звука параллельно линии микрофонов будет выражаться равенством:

$$N_c = 10 \lg \frac{p_c^2}{p_0^2} = 10 \lg [\Phi^2(\theta_1) \cos^2 \theta_1 + \Phi^2(\theta_2) \cos^2 \theta_2]. \qquad (10.4)$$

Подстановка в это общее выражение значений характеристик направленности для всех трех вариантов системы *АВ* соответственно в виде:

$$\Phi(\theta) = 1, \quad \Phi(\theta) = 1 + \cos \theta, \quad \Phi(\theta) = \cos \theta \qquad (10.5)$$

позволяет получить для этих вариантов следующие значения N_c:

$$\left\{ \begin{aligned} N_{c\,I} &= 10 \lg (\cos^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_2); \\ N_{c\,II} &= 10 \lg [\cos^2 \theta_1 (1 + \cos \theta_1)^2 + \cos^2 \theta_2 (1 + \cos \theta_2)^2]; \\ N_{c\,II} &= 10 \lg (\cos^4 \theta_1 + \cos^4 \theta_2). \end{aligned} \right. \qquad (10.6)$$

Как можно видеть из рис. 10.5, в этих выражениях

$$\left.\begin{aligned}\cos\theta_1 &= \frac{y}{d_1} = \frac{\frac{y}{l}}{\sqrt{\left(\frac{y}{l}\right)^2+\left(1+\frac{x}{l}\right)^2}}\\ &\text{и}\\ \cos\theta_2 &= \frac{y}{d_2} = \frac{\frac{y}{l}}{\sqrt{\left(\frac{y}{l}\right)^2+\left(1-\frac{x}{l}\right)^2}}.\end{aligned}\right\} \qquad (10.7)$$

Все расстояния в последних равенствах нормированы по отношению к длине полубазы микрофонов l.

Результаты расчетов по формулам (10.6), графически представленные на рис. 10.6, показывают, что при движении исполнителя вдоль линии микрофонов суммарный уровень сигнала уменьшается по мере приближения источника звука к линии симметрии системы *ОУ* (рис. 10.5). Это уменьшение, судя по кривым *1*, *1′* и *1″* на рис. 10.6, является наибольшим при самых близких расстояниях $\frac{y}{l}=0{,}1$ от исполнителя до линии микрофонов. Такое уменьшение суммарного уровня воспринимается слушателями как удаление источника звука, т. е. как искажение в передаче его движения по глубине пространства. Эти искажения для первого варианта системы (кривые *1*, *2* и *3*) будут наименьшими, а для третьего — наибольшими (кривые *1″*, *2″*, *3″*).

При непараллельном положении осей микрофонов [5], когда оси повернуты внутрь или в стороны на угол $\pm\theta_n$, выражения для N_c по каждому из вариантов системы будут подобными выражениям (10.6) и, в частности, для второго варианта представятся в виде:

$$N_{c\,II} = 10\lg\sum_{n=1,\,2}[1+\cos(\theta_{\text{ср}}-\theta_n)]^2\cos^2\theta_n, \qquad (10.8)$$

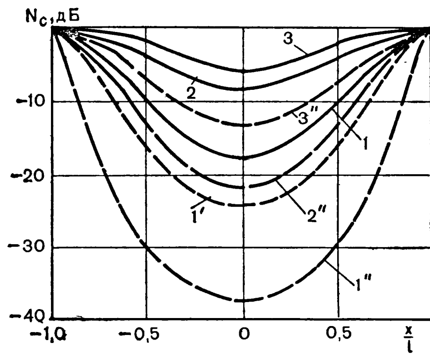


Рис. 10.6. Зависимость суммарного уровня N_c сигнала от размещения исполнителя относительно микрофонов системы при $y/l=0{,}1$ (1, 1″), $y/l=0{,}5$ (2, 2″), $y/l=1$ (3, 3″).

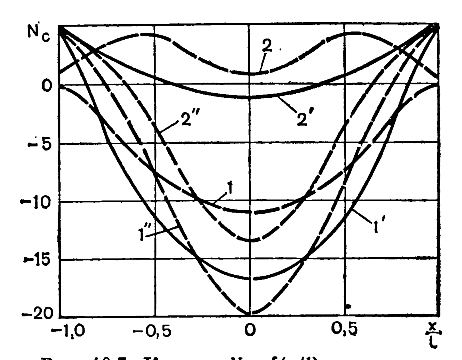


Рис. 10.7. Кривые $N_c=f(x/l)$ для варианта *II* системы *АВ* при нормальном положении микрофонов и их повороте внутрь и наружу

где θ_n — угол, составленный акустической осью каждого микрофона и направлением на источник звука.

Рис. 10.7 иллюстрирует влияние поворота микрофонов системы относительно их нормального положения. Повороту внутрь системы на угол $\theta_n = 60°$ соответствуют кривые *1* и *2*, повороту наружу на угол $\theta_n = 45°$ — кривые *1''* и *2''* и нормальному положению микрофонов — кривые *1'* и *2'*. Кривые *1*, *1'* и *1''* построены при расстоянии $\frac{y}{l}=0{,}1$, а кривые *2*, *2'* и *2''* — при расстоянии 0,5. Как следует из сравнения этих кривых, искажения в передаче движения источника звука по глубине увеличиваются, когда оси микрофонов повернуты от центра системы, и уменьшаются при повороте к нему.

Системы *XY* и *MS*. Отмеченная тождественность вариантов этих систем позволяет провести для них одновременный анализ искажений в передаче движения источника по глубине [19].

Для первого варианта системы *XY*, как это следует из рис. 10.4, *в*, *I*, звуковые давления, создаваемые громкоговорителями на выходе каждого канала, будут равны:

$$p_1 = p_0 \Phi\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)\frac{y}{d} \text{ и } p_2 = p_0 \Phi\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\frac{y}{d}. \qquad (10.9)$$

Для того же варианта системы *MS* эти давления на основе рис. 10.4, *б*, *I* будут:

$$\left.\begin{aligned} p_1 &= p_0\left[\Phi_1(\theta) + \Phi_2\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)\right]\frac{y}{d} \\ \text{и}\quad p_2 &= p_0\left[\Phi_1(\theta) - \Phi_2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right]\frac{y}{d}. \end{aligned}\right\} \qquad (10.10)$$

Если, пользуясь равенствами (10.9) и (10.10), так же как это делалось при получении формулы (10.6), провести определение суммарного уровня сигнала, то для системы *XY* и *MS* получим соответственно

$$N_{cI} = 10\lg\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 = 10\lg\left[\Phi^2\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) + \Phi^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)\right]\left(\frac{y}{d}\right)^2. \qquad (10.11)$$

$$N'_{cI} = 10\lg\left\{\left[\Phi_1^2(\theta) + \Phi_2^2\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)\right]\left(\frac{y}{d}\right)^2\right\} + 3. \qquad (10.12)$$

Подстановка в равенства (10.11) и (10.12) выражений, определяющих собой характеристики направленности микрофонов, работающих соответственно в системах *XY* и *MS*, приводит к получению одинаковых выражений следующего вида:

$$N_{cI} = N'_{cI} = 10\lg(2\cos^2\theta - \cos^4\theta) + 3. \qquad (10.13)$$

Расчеты по формуле (10.13) позволяют построить кривые изменения суммарного уровня сигнала при движении исполнителя по

прямой, перпендикулярной оси системы для первого варианта стереомикрофонов типа *XY* и *MS*. Эти кривые (*1*, *2*, *3*, *4*, *5*), приведенные на рис. 10.8, отвечают случаям, когда расстояние $\frac{y}{l}$ равнялось 0,1; 0,3; 0,5; 1 и 2. Они показывают, что уменьшение расстояния приводит к большому изменению суммарного уровня сигнала

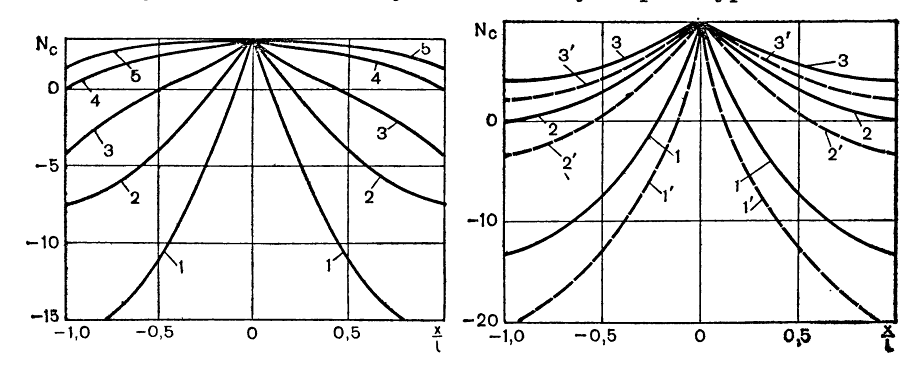


Рис. 10.8. Кривые суммарного уровня сигнала для варианта *I* систем *XY* и *MS* и разных расстояниях исполнитель — микрофон

Рис. 10.9. Кривые суммарного уровня сигнала для вариантов *II* и *III* систем *XY* и *MS*

(до 17 дБ) при смещении исполнителя вправо и влево от оси симметрии системы, т. е. к большим искажениям в передаче движения источника звука по глубине.

Как можно заметить по рис. 10.4, *б* и *в*, равенства (10.11) и (10.12), определяющие суммарный уровень сигнала для варианта *I* системы *XY* и *MS*, могут быть отнесены и к вариантам *II* и *III*, если в них значение $\frac{\pi}{2}$ заменить на $\frac{\pi}{4}$. После такой замены и подстановки в новые равенства выражений для характеристик направленности, соответствующих этим вариантам, для них можно получить формулы вида:

$$N'_{c\,II} = 10 \lg (\cos^2 \theta + \cos^3 \theta) + 6, \qquad (10.14)$$

$$N_{c\,III} = N'_{c\,III} = 10 \lg \cos^2 \theta. \qquad (10.15)$$

На рис. 10.9 приведены кривые изменения суммарного уровня сигнала при перемещении исполнителя вдоль линии микрофонов на расстоянии $\frac{y}{l}$ равном 0,1; 0,5; 1,0. Группа кривых *1*, *2*, *3* относится к варианту *II* системы *MS*, а кривых *1′*, *2′*, *3′* — к варианту *III* систем *MS* и *XY*.

Рис. 10.6, 10.8 и 10.9 позволяют сравнить кривые $N_c = f\left(\frac{x}{l}\right)$, полученные при одинаковых значениях $\frac{y}{l}$ и характеризующие ис-

кажения в передаче движения по глубине для всех вариантов систем *AB*, *XY* и *MS*. Они показывают, что по величине и этих искажений варианты *I* и *III* систем *XY* и *MS* почти не отличаются от варианта *II* (с кардиоидными микрофонами) системы *AB*. Что же касается варианта *II* системы *XY*, то он по искажениям близок к варианту *III* системы *AB* (с косинусоидальными микрофонами), а тот же вариант системы *MS* хуже варианта *II* системы *AB*.

Очевидно, когда исполнитель перемещается не по нормали к оси систем *XY* и *MS*, а по дуге окружности, расстояние от него до микрофонов остается постоянным и значения $\cos^2\theta$ в формулах (10.13), (10.14) и (10.15) становятся равными 1. В этом случае искажения в передаче движения по глубине уменьшаются до $2 \div 5$ дБ для вариантов *I* и *II* и вовсе исключаются для варианта *III*.

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Стереофоническим системам типа *AB*, *XY* и *MS* свойственны искажения в передаче движения по глубине. В системе с ненаправленными микрофонами (вариант *I* системы *AB*) они самые малые и в неблагоприятных условиях $\left(\frac{y}{l} = 0{,}1\right)$ достигают 15 дБ. Искажения становятся больше (при тех же условиях до 20 дБ) при сочетании микрофонов ненаправленного и однонаправленного типов (вариант *I* системы *MS*) или двух однонаправленных микрофонов (вариант *II* системы *AB* и варианты *I* и *II* систем *XY* и *MS*) и возрастают до 30 дБ и больше при применении в системе микрофонов двухстороннего приема (третьи варианты систем *AB, XY* и *MS*).

2. Эти искажения для каждого варианта любой из систем уменьшаются при увеличении относительного расстояния $\frac{y}{l}$.

3. Перемещение исполнителя от центра систем *XY* и *MS* к их краям связано с увеличением искажений по глубине, тогда как для системы *AB* они растут при перемещении от краев к центру.

4. Поворот микрофонов друг к другу в системе *AB* приводит к уменьшению, а поворот друг от друга — к увеличению искажений в передаче движения по глубине.

5. В системах *XY* и *MS* при движении исполнителя или размещении оркестра по дуге окружности с центром в точке расположения микрофонов искажения в передаче движения по глубине или полностью исчезают (вариант *III*), или очень уменьшаются (варианты *I* и *II*).

10.4. Искажения в передаче движения кажущегося источника звука по фронту

Уже отмечалось, что для правильной передачи фронтального движения КИЗ нужно, чтобы разность уровней $N_{\text{р}}$ сигналов, передаваемых стереосистемой во вторичное помещение, изменялась бы по закону, отвечающему кривым слухового восприятия стереоэффекта, показанным на рис. 10.2, *а, б*. В связи с этим задачу определения искажений в передаче движения по фронту следует решать в два

этапа. Сначала нужно установить, как изменяется разность уровней $N_р$ сигналов, передаваемых стереосистемой, а потом — как правильно передается перемещение КИЗ при таком изменении $N_р$.

Система *AB* [5]. Принимая во внимание, что слушатели во вторичном помещении занимают определенные места, углы приема сигналов и чувствительности громкоговорителей можно считать постоянными. В этом случае относительное изменение уровня сигнала при звуковоспроизведении, вызванное перемещением исполнителя вдоль линии микрофонов, для каждого из громкоговорителей будет:

$$\left.\begin{aligned} N_1 &= 20\lg\frac{p_1}{p_0} = 20\lg\Phi(\theta_1)\cos\theta_1; \\ N_2 &= 20\lg\frac{p_2}{p_0} = 20\lg\Phi(\theta_2)\cos\theta_2. \end{aligned}\right\} \quad (10.16)$$

Разность уровней сигналов от двух громкоговорителей, определяющих положение КИЗ, будет:

$$N_р = 20\lg\frac{p_1}{p_2} = 20\lg\frac{\Phi(\theta_1)\cos\theta_1}{\Phi(\theta_2)\cos\theta_2}. \quad (10.17)$$

Так как для ненаправленных микрофонов $\Phi(\theta) = 1$, то для варианта *I* рассматриваемой системы равенство (10.17) с учетом (10.7) можно переписать в виде:

$$N_р = 20\lg\frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} = 20\lg\sqrt{\frac{\left(\frac{y}{l}\right)^2 + \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2}{\left(\frac{y}{l}\right)^2 + \left(1 + \frac{x}{l}\right)^2}}. \quad (10.18)$$

Кривые *1*, *2*, *3* и *4*, построенные для этого случая при расстояниях $\frac{y}{l}$ равных 0,1; 0,3; 0,5; 1,0, приведены на рис. 10.10, *а*.

Решая вторую часть задачи, нужно определить, какая из этих кривых более других отвечает условиям неискаженной передачи движения КИЗ по фронту. Для этого справа от рис. 10.10, *а* строится кривая зависимости $N_{р.опт} = f\left(\frac{x'}{l'}\right)$, показывающая, как при заданном изменении $N_р$ изменяется положение КИЗ. Последняя зависимость определена экспериментально и соответствует кривой *1* на рис. 10.2. Сравнивая каждую из кривых графика *а* с кривой графика *б*, в нижней части рис. 10.10 строят кривые (*1'*, *2'*, *3'*, *4'*) зависимости $\frac{x'}{l'}$ от $\frac{x}{l}$, из которых видно, как точно перемещение $\frac{x}{l}$ первичного источника звука передается КИЗ во вторичном помещении.

Так как кривые $N_р = f\left(\frac{x}{l}\right)$ и $\frac{x'}{l'} = f(N_р)$ симметричны отно-

сительно начала координат, то на рис. 10.10 даны только те их части, где $N_р$ и $\frac{x'}{l'}$ имеют положительный знак.

По кривым рис. 10.10, *в* можно установить, что наименьшие искажения в передаче фронтального движения имеют место при

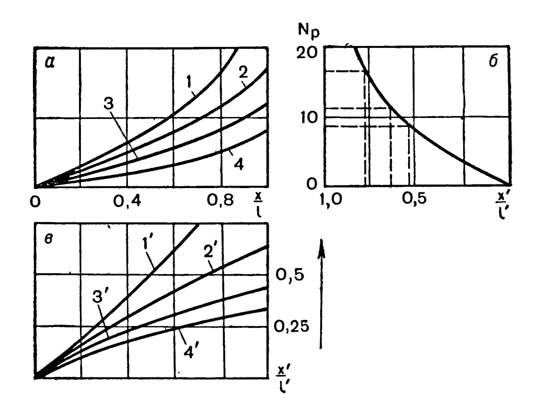


Рис. 10.10. Метод определения зависимости между перемещениями источника звука и его КИЗ для варианта *I* системы *АВ*

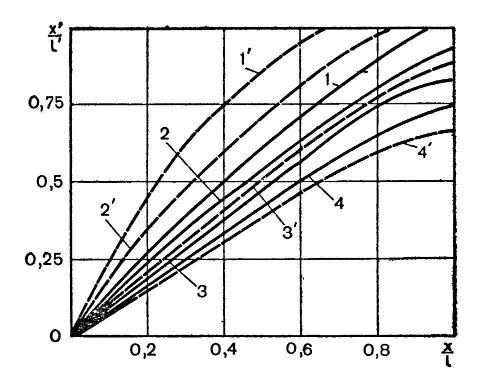


Рис. 10.11. Зависимость между перемещениями действительного источника и КИЗ для вариантов *II* и *III* системы *АВ* при разных *y/l*

самом малом расстоянии до микрофонов $\frac{y}{l}=0{,}1$. Если это расстояние увеличивать до 1,0, то искажения возрастут до 50%, т. е. КИЗ во вторичном помещении будет проходить только половину положенного ему пути. Вместе с тем из рис. 10.6 следует, что изменение $\frac{y}{l}$ от 0,1 до 1,0 вызывает снижение искажений в передаче движения по глубине. Следовательно, эти два вида искажений противопо-

ложным образом связаны с расстоянием между исполнителем и линией микрофонов и изменение этого расстояния в отношении одного из них вызывает уменьшение, а в отношении другого — увеличение искажений.

Подстановка выражений (10.5), определяющих собой направленные свойства кардиоидных и косинусоидальных микрофонов в равенство (10.17), позволяет получить формулы, связывающие между собой N_p и $\frac{x}{l}$ для вариантов *II* и *III* системы *AB*, в виде:

$$\left.\begin{aligned} N_p &= 20\lg\frac{\cos\theta_1+\cos\theta_1'}{\cos\theta_2+\cos\theta_2} \\ \text{и}\qquad & \\ N_p &= 40\lg\frac{\cos\theta_1'}{\cos\theta_2}. \end{aligned}\right\} \qquad (10.19)$$

Если по этим формулам построить кривые $N_p = f\left(\frac{x}{l}\right)$ и воспользоваться методом, примененным при решении подобной задачи для варианта *I*, то можно получить кривые, изображенные на рис. 10.11 и характеризующие искажения фронтального типа для вариантов *II* и *III* той же системы. Сопоставление их с кривыми рис. 10.10, *в* позволяет установить, что для варианта *II* эти искажения при всех значениях $\frac{y}{l}$, равных 0,1; 0,3; 0,5; 1,0 (кривые *1*, *2*, *3*, *4*), заметно меньше, чем для варианта *I*. Для варианта же *III* (кривые *1'*, *2'*, *3'*, *4'*) они изменяются не только по величине, но и по характеру. Изменение значения $\frac{y}{l}$ может привести как к относительному замедлению и сокращению фронта движения КИЗ (кривые *3*, *3'*), так и к ускорению этого движения (кривые *1*, *1'*), в результате чего он достигает предельного положения, когда действительный источник совершит только часть своего пути.

Для полной оценки системы *AB* следует рассмотреть влияние поворота микрофонов к центру системы и от него. Расчеты, выполненные при угле $\theta_{ср} = \pm 45°$, убеждают в том, что поворот к центру приводит к резкому сокращению фронта движения КИЗ, а поворот от центра — к его расширению. Однако, как и при параллельности осей микрофонов, указанным изменениям во фронтальном движении сопутствуют изменения в движении по глубине, имеющие противоположный характер (см. кривые *1, 2* и *1'*, *2'* на рис. 10.7). Вот почему система *AB* с микрофонами, повернутыми к ее оси или от нее, не дает заметных улучшений в передаче движения КИЗ, если не считать того, что искажения по глубине легче устраняются.

Системы *XY* **и** *MS* [21]. Полное или близкое повариантное сходство систем *XY* и *MS* позволяет, так же как для системы *AB*, найти математические выражения разности уровней N_p сигналов соответственно для вариантов *I*, *II*, *III* в виде:

$$
\left.\begin{aligned}
N_{p\,I} &= 20\lg \frac{1+\sin\theta}{1-\sin\theta};\\
N_{p\,II} &= 20\lg \frac{1+A(\cos\theta+\sin\theta)}{1+A(\cos\theta-\sin\theta)};\\
N_{p\,III} &= 20\lg \frac{\cos\theta+\sin\theta}{\cos\theta-\sin\theta}.
\end{aligned}\right\} \qquad (10.20)
$$

По формулам (10.20), пользуясь применяемым уже графическим методом, можно построить кривые зависимости перемещения $\frac{x'}{l'}$ КИЗ от перемещения $\frac{x}{l}$ действительного источника (рис. 10.12). Эти кривые отвечают расстояниям от линии перемещения исполнителя до микрофона, равным 0,1; 0,5; 1,0. Из них видно, что для варианта *I* обеих систем при больших расстояниях $\frac{y}{l}$ (кривая *3*) движение КИЗ замедляется и его фронт заметно сокращается. При малых $\frac{y}{l}$ (кривая *1*) скорость движения, наоборот, быстро растет и КИЗ намного опережает действительный источник звука. В случае варианта *II* (кривые *1′*, *2′*, *3′*) скорость движения КИЗ очень мала и фронт его сокращается даже при самых малых расстояниях $\frac{y}{l}$. Для варианта *III* (кривые *1″*, *2″*, *3″*), наоборот, скорость так велика, что КИЗ совершает полный путь между громкоговорителями, когда исполнитель едва успевает пройти 0,1; 0,65 или 0,9 своего пути. Дальнейшее движение исполнителя вызывает возвратное движение КИЗ. Это происходит потому, что исполнитель при фронтальном движении выходит за пределы угла $\theta_{кр}$ (см. рис. 10.4, *III*), когда чувствительность одного из микрофонов системы после нарастания начинает падать.

Приведенный анализ позволяет сделать ряд выводов.

1. В стереофонических системах возникают искажения в передаче фронтального движения КИЗ (по протяженности фронта и скорости движения). Они зависят от вида характеристик направленности микрофонов, используемых в тех или иных вариантах систем.

2. Эти искажения связаны также с относительным расстоянием между линией перемещения исполнителя и микрофонами. Чем оно больше, тем

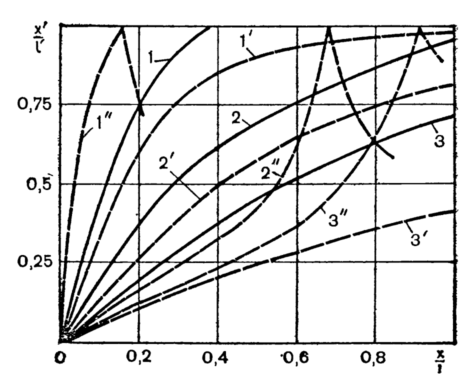


Рис. 10.12. Связь между перемещением источника звука и КИЗ для вариантов *I*, *II*, *III* систем *XY* и *MS* при разных расстояниях *y/l*

больше сокращение фронта и меньше искажения скорости движения КИЗ.

3. Поворот микрофонов к оси системы вызывает увеличение искажений фронтального типа, поворот в стороны от оси — уменьшение их. Это справедливо для всех систем, что видно из примера поворота микрофонов в системе *XY* (переход от варианта *II* к варианту *I*).

4. Размещение исполнителей или их движение по дуге относительно микрофонов системы *XY* и *MS* приводит к уменьшению предельных значений $N_р$ и к увеличению фронтальных искажений.

10.5. Стереофоническая передача реверберационного процесса

Стереофоническая система должна обеспечивать для слушателей, находящихся во вторичном помещении, не только правильное восприятие положения или движения любого из источников звука, сигналы от которых воспринимались ее микрофонами в первичном помещении, но и создавать впечатление об акустической обстановке этого помещения.

При непосредственном слушании эта обстановка создается реверберационным процессом, который определяется различиями в уровнях, во времени и направлении прихода отраженных в помещении сигналов. Причем разнонаправленность этих сигналов слух обнаруживает на начальном этапе затухания, когда различие во времени прихода отраженных сигналов еще достаточно велико.

Известно, что одноканальная система передает без искажений различия только для двух первых определяющих факторов реверберационного процесса, разнообразия же в направлениях прихода отраженных сигналов она передать не может. Все отраженные в первичном помещении сигналы передаются ею с одного направления, идущими от громкоговорителя. Исходя из этого, представляется необходимым рассмотреть вопрос о том, в какой мере стереосистемы в состоянии передать характерную для сигналов, возникающих в помещениях, разнонаправленность отражений, создающих реверберационный процесс.

Определяя длины звукового луча любого отражения и времени прихода каждого из них [17] к микрофонам стереосистемы, можно для данного первичного помещения построить временные уровнеграммы отраженных сигналов [23]. Такая уровнеграмма для системы *AB* с кардиоидными микрофонами (вариант *II*) в случае, когда расстояние от источника звука до линии микрофонов $\frac{y}{l} = 0{,}5$, а смещение его от оси системы составляет $\frac{x}{l} = 1{,}0$, показана на рис. 10.13 вертикальными линиями. Вверх по оси ординат отложены значения звуковых давлений для ряда отражений, принятых первым микрофоном, а вниз — такие же значения давлений, принятых вторым из них. Пользуясь уровнеграммой, можно определить разность

уровней N_p сигналов, принятых обоими микрофонами, для каждого следующего друг за другом отражения. Оказывается, что они изменяются в широких пределах с частыми переходами из области положительных значений в область отрицательных значений. Особенно большой разброс этих величин наблюдается на начальном этапе (до 50÷60 мс) затухания реверберационной энергии (рис. 10.13).

Результаты этого расчета вместе с графиком рис. 10.10, *б*, связывающим разность уровней N_p сигналов с положением $\frac{x}{l'}$ КИЗ,

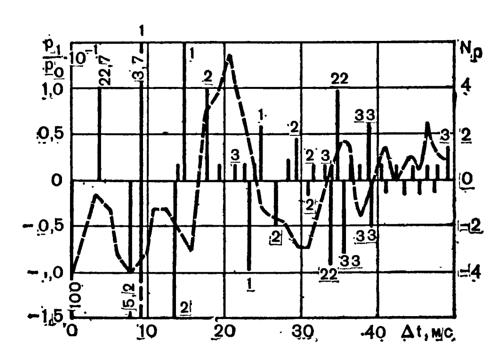


Рис. 10.13. Временной спектр звуковых давлений первых отражений и изменение их уровней N_p (ломаная кривая) для помещения с $V=1100$ м³ при $y/l=0,5$ и $x/l=1,0$

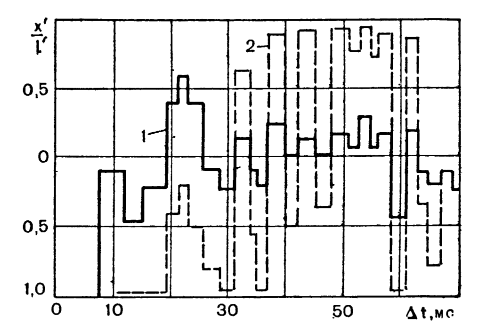


Рис. 10.14. Временная картина перемещения КИЗ в зависимости от изменений N_p (*1*) и $\Delta\tau$ (*2*), соответствующих условиям рис. 10.13

позволяют найти точки на линии между громкоговорителями системы, откуда приходят отражения, и построить временную картину перемещения КИЗ, обусловленных этими отражениями. Она представлена непрерывной ломаной линией *1* на рис. 10.14. Из рисунка видно, что кажущиеся источники, созданные различными отражениями одного и того же сигнала, в процессе затухания энергии занимают различное положение в пределах базы воспроизводящей системы и направление их прихода для каждого слушателя все время

меняется. Через 20÷30 мс после начала реверберационного процесса пределы перемещения КИЗ становятся меньше, и те из них, которые можно отнести к группе третьих и т. д. отражений, начинают перемещаться только вблизи оси системы.

Нужно иметь в виду, что для системы *AB* положение КИЗ определяется не только разностью уровней $N_р$, но и разностью во времени $\Delta\tau$ запаздывания в приеме каждого отраженного сигнала микрофонами системы. Подсчитывая эти запаздывания и определяя соответствующие смещения КИЗ, можно построить временну́ю картину, полученную с учетом изменения $\Delta\tau$, которая показана прерывистой ломаной линией *2* на рис. 10.14. Эта кривая указывает на еще бо́льший разброс в направлениях прихода прежде всего первых отражений, чем это имело место при воздействии разности уровней. Все последующие отражения, приходящие через 20÷40 мс после начала реверберационного процесса, будут совпадать по направлению то с одним, что с другим из крайних громкоговорителей. Для них различия во времени прихода $\Delta\tau$ одного и того же отражения к микрофонам системы становятся больше 1÷3 мс, что, как показывает эксперимент, приводит к нарушению условий локализации, и такие отражения не могут быть выделены слухом из общей гулкости, создаваемой реверберационным процессом.

Таким образом, наличие интенсивностных и временны́х разностей для сигналов, принимаемых микрофонами стереофонической системы *AB*, независимо от того, являются они прямыми или отраженными, приводит к тому, что те и другие будут локализоваться в различных точках в пределах базы звуковоспроизведения. Так как временны́е интервалы между соседними отражениями даже в начале процесса затухания не слишком велики, то каждое из отражений не может восприниматься слухом раздельно; они создают только впечатление о разнообразии направлений их прихода, точно так же как и при непосредственном восприятии реверберационного процесса. Следовательно, пространственное восприятие реверберации, представляющее собой важную особенность стереофонических передач, является одним из выражений локализационных свойств слухового аппарата.

Для систем *XY* и *MS* фактором, определяющим разнонаправленность прихода первых отражений, может быть только разность уровней $N_р$ сигналов, принимаемых микрофонами. Поэтому для них характер перемещения КИЗ для отраженных сигналов будет выражаться так, как показано ломаной линией *1* на рис. 10.14. Для них разброс в направлениях прихода отражений будет меньшим, чем для системы *AB*, что, очевидно, должно приводить к созданию менее яркой пространственной картины.

В итоге рассмотрения вопроса о создании естественной акустической обстановки можно сделать несколько выводов.

1. Сравнительно редкие отражения первого порядка, создающие реверберационный эффект, воспринимаются слухом при стереофонических передачах как приходящие с разных направлений в пределах между крайними громкоговорителями системы. Они не только

несут информацию о размерах помещения, но и при стереопередачах создают определенную пространственность реверберационного процесса, характерную для его восприятия в естественных условиях.

2. Пространственная реверберация полнее проявляется при звукопередаче по системе AB, так как она обусловливается разностью в уровнях и разностью во времени прихода отраженных сигналов, и менее четко при передаче по системе XY и MS, потому что для них она создается только первым из названных факторов.

3. Увеличение разброса в направлениях прихода отраженных сигналов связано с увеличением расстояния ($2l$) между микрофонами системы с их несимметричным размещением относительно стен помещения и с размерами последнего.

10.6. Акустические условия в первичных помещениях, предназначенных для стереофонических передач

При стереопередачах звуковое поле во вторичном помещении делается более сложным, чем при передачах одноканальных. Такое усложнение связано прежде всего с количественными изменениями, вызываемыми работой группы микрофонов в первичном помещении [17].

Звуковая энергия E, излучаемая каждым громкоговорителем системы, во вторичном помещении будет пропорциональна величине прямой $E'_{\text{пр}}$ и отраженной $E'_{\text{отр}}$ энергий, воздействующих на соответствующий микрофон в первичном поле. При условии диффузности звукового поля в нем отраженная энергия, переданная во вторичное помещение, будет пропорциональна числу микрофонов m. Исходя из этого, отраженная звуковая энергия, излучаемая во вторичном помещении при работе одноканальной системы, с учетом равенства (8.8) будет выражаться через звуковое давление p_0 в виде:

$$E''_{\text{отр}} = kE'_{\text{отр}} = k\,\frac{4P_a}{c_0 \alpha S}\,(1-\alpha) = k\,\frac{4p_0^2}{c_0^2 \rho S}\cdot\frac{1-\alpha}{\alpha}, \qquad (10.21)$$

а для m — канальной стереофонической системы типа AB в виде:

$$E'_{\text{отр}_m} = kE'_{\text{отр}_m} = mk\,\frac{4p_0^2}{c_0^2 \rho_0 S}\cdot\frac{1-\alpha}{\alpha}. \qquad (10.22)$$

Прямая энергия, передаваемая во вторичное помещение стереофонической системой, также увеличится по сравнению с одноканальной, но менее заметно. Это происходит потому, что прямая энергия для каждого канала будет не одинаковой, а уменьшающейся по мере увеличения расстояния d и угла приема θ соответствующего микрофона относительно источника звука.

Для одноканальной системы, исходя из равенств (8.7) и (10.2а), прямая энергия, передаваемая во вторичное помещение, будет:

$$E''_{\text{пр}} = \frac{P_a}{4\pi r^2 c_0} = \frac{p_1^2}{4\pi r^2 c_0^2 \rho_0} = \frac{p_0^2}{4\pi r^2 c_0^2 \rho_0} \Phi^2(\theta_1)\cos^2\theta_1. \qquad (10.23)$$

В случае стереофонической системы AB плотность прямой энергии будет выражаться равенством, подобным (10.23), в котором числитель дроби p_1^2 заменен суммарной величиной p_c^2. Эта величина, согласно правилу энергетического суммирования, выражается в виде:

$$p_c^2 = p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \cdots + p_m^2 \qquad (10.24)$$

или на основании выражения (10.4) в виде:

$$p_c^2 = p_0^2 \sum_m \Phi^2(\theta_m)\cos^2\theta_m. \qquad (10.25)$$

Следовательно, прямая энергия в случае стереофонической передачи будет представляться равенством

$$E''_{\text{пр}_m} = \frac{p_0^2}{4\pi r^2 c_0^2 \rho_0} \sum_m \Phi^2(\theta_m)\cos^2\theta_m. \qquad (10.26)$$

Выражения (10.21) и (10.23) позволяют определить для одноканальной системы отношение

$$\frac{E''_{\text{отр}}}{E''_{\text{пр}}} = \frac{16\pi r^2}{S\Phi^2(\theta_1)\cos^2\theta_1} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha}, \qquad (10.27)$$

а выражения (10.22) и (10.26) — такое же отношение и для стереофонической системы AB:

$$\frac{E''_{\text{отр}_m}}{E''_{\text{пр}_m}} = \frac{16\pi r^2 m}{S\sum_m \Phi^2(\theta_m)\cos^2\theta_m} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha}. \qquad (10.28)$$

Так как оптимальные акустические условия в помещениях устанавливались для одноканальных передач, то появилась необходимость определить, какими они должны быть, чтобы при проведении стереофонических передач остаться по-прежнему оптимальными. Это возможно при равенстве отношений, представляемых выражениями (10.27) и (10.28). Следовательно, приравнивая эти выражения, можно найти значения α' и T', соответствующие оптимуму для стереофонических передач. Первая из этих величин после преобразования представится в виде:

$$\alpha' = \frac{m\alpha\Phi^2(\theta_1)\cos^2\theta_1}{(1-\alpha)\sum_m \Phi^2(\theta_m)\cos^2\theta_m + m\alpha\Phi^2(\theta_1)\cos^2\theta_1}, \qquad (10.29)$$

а вторая на основании (8.4) определится из выражения

$$\frac{T'}{T} = \frac{\lg(1-\alpha)}{\lg(1-\alpha')} = k \text{ в виде } T' = kT, \qquad (10.30)$$

где T и T' — время реверберации, воспринимаемое в помещении при работе одноканальной и стереофонической систем, а k — коэффициент изменения этого времени при переходе от одной системы к другой.

Равенства (10.29) и (10.30) могут быть отнесены и к системам XY и MS, если помнить, что число каналов у них $m = 2$, а угол θ_m

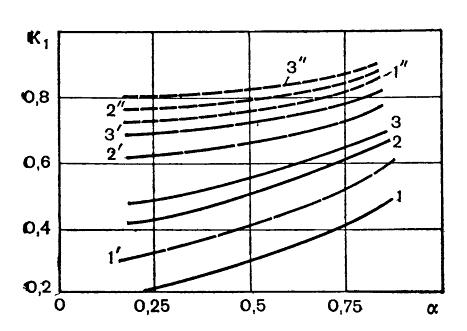


Рис. 10.15. Зависимость коэффициента уменьшения реверберации k от α для варианта *II* системы *AB* при числе каналов *2*, *3*, *5*

Рис. 10.16. Зависимость коэффициента уменьшения реверберации k от α для вариантов *I*, *II*, *III* при пяти каналах и y/l=0,5 и 1,0

определяется через расстояние от микрофона до источника звука. По формулам (10.29), (10.5) можно определить зависимости $k = f(\alpha)$ для каждого из вариантов системы AB при разных значениях $\frac{y}{l}$ и m. Такая зависимость для варианта *II* (однонаправленные микрофоны) приведены на рис. 10.15. На нем кривые *1*, *2*, *3* соответствуют значениям m равным 2, 3 и 5 при $\frac{y}{l} = 0{,}5$; кривые же *1′*, *2′*, *3′* и кривые *1″*, *2″*, *3″*, отвечая тем же значениям m, построены для случаев, когда расстояние $\frac{y}{l}$ равнялось 1 и 2.

Кривые $k = f(\alpha)$ для вариантов — *I* (*1*, *1′*), *II* (*2*, *2′*) и *III* (*3*, *3′*) системы *AB* изображены на рис. 10.16. Те из них, которые показаны сплошными линиями, отвечают расстояниям $\frac{y}{l} = 0{,}5$, прерывистыми линиями $\frac{y}{l} = 1$.

Анализ кривых на рис. 10.15 и 10.16 приводит к выводам.

1. Коэффициент k при широких изменениях α, m и $\frac{y}{l}$ остается всегда меньше единицы. Следовательно, T' всегда меньше T.

2. Этот коэффициент заметно возрастает при их переходе от двух каналов к трем и мало при дальнейшем увеличении их числа. В частности, для квадрафонической системы он достигает величины 0,6÷0,8.

3. При расстояниях $\frac{y}{l} \geqslant 2$ коэффициент k становится почти постоянным и все больше приближается к 1.

4. При прочих равных условиях варианту *III* соответствует самый малый коэффициент k, а варианту *I* — самый большой.

5. При переходе от одноканальных к стереофоническим передачам время реверберации в первичном помещении в среднем должно быть снижено для системы *AB* на 20÷40% и систем *XY* и *MS* на 10÷20%.

10.7. Зрительная коррекция локализационных искажений при кинопоказе

Обычно единый источник зрительной и звуковой информации благодаря высокой разрешающей способности зрения локализуется на основе зрительного восприятия. Если искусственно отделить звуковой образ от зрительного, то доверие к зрительному восприятию оказывается настолько большим, что у наблюдателя создается впечатление, что эти два образа находятся ближе, чем на самом деле, или даже сливаются.

При показе стереофонических фильмов искажения фронтального типа приводят к пространственной несовместимости связанных в одном образе звуковой информации и зрительной. Эффект сближения и в этом случае будет вызывать корректирующее действие и снижать жесткие требования к стереофоническим системам в отношении фронтальных искажений. В связи с этим необходимо выяснить характер и величину этой коррекции для звукового образа, являющегося не реальным, а кажущимся.

Для определения влияния зрительного восприятия объекта на локализацию соответствующего ему звучания, но отличающегося по положению КИЗ, была проведена серия опытов [21, 22]. Результаты одного из них приведены на рис. 10.17. На нем представлена зависимость фронтального положения КИЗ $\left(\frac{x''}{l'}\right)$ от разности уров-

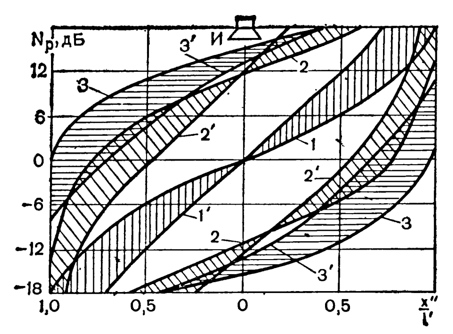


Рис. 10.17. Положение КИЗ в отсутствии (*1*, *2*) и при наличии (*1'*, *2'*) изображения *И* действительного источника звука и смещении слушателя y''/l' равном 0; 0,5; 1,0

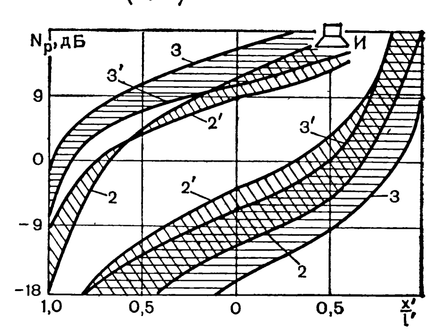


Рис. 10.18. Положение КИЗ в отсутствии и при смещении изображения *И* с оси звуковоспроизводящей системы в сторону на $x'/l'=0{,}5$

ней $N_р$ сигнала в каналах двухканальной воспроизводящей системы для слушателей, расположенных на расстоянии $\frac{y''}{l'}=2$ в точке $\frac{x''}{l'}=0$, т. е. на оси системы (кривые *1* и *1'*) и в точках $\frac{x''}{l'}=\pm 0{,}5$ (кривые *2* и *2'*). Кривые *1* и *2* построены по данным наблюдений без зрительного объекта, кривые *1'* и *2'* — при его наличии на оси системы.

По рис. 10.17 можно заметить, что кривые, полученные при восприятии зрительного образа (*1'* и *2'*), располагаются более круто и пересекаются с кривыми (*1* и *2*), полученными без него, в том месте, где располагается зрительный объект. Это показывает, что зрительный образ приближает к себе звуковой, причем притягивающее действие очень зависит от положения наблюдателя. Так, при центральном его положении это действие составляет примерно 10% от длины полубазы громкоговорителей, при смещении его по оси x на $\frac{x''}{l'}=0{,}5$ притяжение увеличивается до 20%, а при $\frac{x''}{l'}=1$ (кривые *3* и *3'*) — даже до 35÷40%.

Как показали опыты, если слушатели находятся в два раза дальше от линии громкоговорителей, то дополнительное смещение $\frac{\Delta x'}{l'}$, обусловленное воздействием изображения, увеличивается до 20 и 50% соответственно для случаев их центрального положения и смещения от центра на расстоянии $\frac{x''}{l'}=1$.

Если теперь сместить зрительный объект из положения $\frac{x'}{l'}=0$ в положение $\frac{x'}{l'}=+0{,}5$, то такое смещение, как это следует из рис. 10.18, приводит к заметному нарушению симметрии в расположении пар кривых *1* и *1'*, *2* и *2'*, *3* и *3'*. Заштрихованные полосы, характеризующие влияние зрительного объекта в нижней правой части этого рисунка, значительно расширяются по сравнению с верхней левой. Это означает, что для слушателей, расположенных перед зрительным объектом или под сравнительно малым углом по отношению к нему $\left(\frac{x''}{l'}\text{ равно } +1 \text{ или } 0\right)$, влияние зрительного восприятия на местоположение КИЗ значительно больше, чем для слушателей, заметно смещенных влево и находящихся в точках с абсциссой $\frac{x''}{l'}$ равной —0,5 или — 1.

Кривые рис. 10.18 были построены для случая, когда удаление слушателей $\frac{y''}{l'}=2$, а смещение зрительного объекта составляло $\frac{x'}{l'}=+0{,}5$. Если же увеличить ту или другую из этих величин, то расположение кривых резко изменяется. Если удалить слушате-

лей на расстояние $\frac{y''}{l'}=5$, то асимметрия кривых, характерная для $\frac{y''}{l'}=2$, заметно уменьшается. Присутствие зрительного образа приводит ко все меньшему различию в восприятии КИЗ для слушателей, сидящих на центральных и крайних местах одного и того же ряда. Следовательно, корректирующее действие зрительного восприятия возрастает вместе с увеличением смещения слушателей от центра к краям ряда зрительских мест. Если увеличить смещение зрительного объекта до $\frac{x'}{l'}=+1$, то асимметрия, обнаруживаемая для кривых рис. 10.18, сохранится, однако характер самих кривых изменится. Для слушателей, смещенных, как и зрительный объект, вправо, дополнительное смещение не может быть большим. Когда же слушатели располагаются слева от оси системы, то движение КИЗ слева направо благодаря притяжению зрительного образа, расположенного справа, становится значительным, и дополнительное смещение достигает для них величины $\frac{\Delta x'}{l'}=0{,}8$.

Опыты также показали, что влияние зрительного восприятия на слуховое усиливается при увеличении времени реверберации во вторичном помещении и при изменении характера передаваемого звучания с чисто тонального на речевой или музыкальный. Влияние зрительного образа на положение КИЗ оказывается не зависящим от того, является этот образ статическим или динамическим.

Учитывая большую важность корректирующего действия изображения в отношении искажений фронтального типа, здесь следует выделить несколько частных положений.

1. Величина корректирующего смещения КИЗ связана с удалением слушателя от звуковоспроизводящей системы. Это смещение возрастает по мере удаления от линии громкоговорителей. Для слушателей, сидящих в центре первых рядов зала, оно составляет $10\div20\%$, для средних рядов — $23\div30\%$.

2. Эффект «притяжения» звукового образа к соответствующему ему изображению возрастает для слушателей, смещенных в стороны относительно оси системы. Это приводит к уменьшению различия в восприятии КИЗ центральными и периферийными слушателями, причем различие уменьшается вместе с удалением слушателей.

3. Особенно велико смещение $\frac{\Delta x'}{l'}$ в том случае, когда слушатель и КИЗ находятся по одну сторону от центра системы, а изображение объекта — по другую. В этом случае корректирующее смещение возрастает с 15—20% $\left(\text{при } \frac{y'}{l'}=2\right)$ до 100% при $\frac{y''}{l'}=5$.

10.8. Разделимость сигналов и тембр звучания при стереопередачах

Даже при одноканальной звукопередаче слуховой аппарат способен выделить звучание отдельного инструмента или их группы из сложного оркестрового звучания. Эта способность обусловлена тем, что выделяемые сигналы несут информацию, отличающую их по

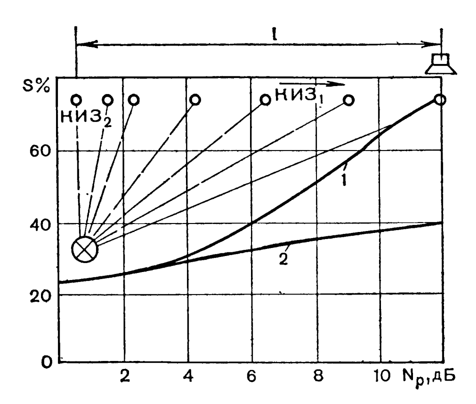


Рис. 10.19. Зависимость слоговой разборчивости S от разности уровней сигналов крайнего КИЗ$_1$ и среднего КИЗ$_2$, создаваемых стереосистемой

одному или ряду таких звуковых признаков, как интенсивность, тембр, временна́я характеристика. Слушатель распознает тот или иной долговременный признак или группу признаков данного сигнала и сосредоточивает свое внимание па звучании тех из источников, составляющих музыкальный ансамбль, для которых этот признак наиболее характерен.

Естественно, что эта способность слуха сохраняется и при стереофонической передаче, однако разделимость в этом случае значительно повышается. Это происходит потому, что слуховой аппарат наряду с разделением источников звука по указанным признакам может разделить их еще и по направлению прихода сигналов. Это подтверждается опытами Е. Шуберта (рис. 10.19) по определению слоговой разборчивости (S%) речи, одновременно передаваемой несколькими КИЗ, разделяемыми в пространстве с помощью изменения разности уровней N_p сигналов крайнего КИЗ$_1$ (кривая *1*) и центрального КИЗ$_2$ (кривая *2*), создаваемых стереофонической системой.

Как видно из рисунка, увеличение N_p, приводящее к все большему удалению КИЗ$_1$ от КИЗ$_2$, разборчивость все больше возрастает. Это указывает на все бо́льшую разделимость звуковых образов, вызванную увеличением различия в углах приема каждого из КИЗ, о чем можно судить по их положению при малых и больших значениях N_p, показанному в верхней части рис. 10.19. Отсюда следует, что разделение КИЗ еще и по направлению приводит к значи-

тельному улучшению информации не только семантического (по разборчивости, но и эстетического характера, повышая в случае музыкальных передач прозрачность звучания.

Стереофонические системы повышают эстетическую ценность звучания и в отношении более качественной передачи его тембральных особенностей.

Как было показано (параграф 6.4), применение двух микрофонов при одноканальной звукопередаче приводит к появлению частотных искажений. Эти искажения представлены графической кривой рис. 6.2, *а*, провалы на которой расширяются вместе с уменьшением разности Δd расстояний от микрофонов до источника звука, что указывает на выпадение из сложного сигнала все большего числа групп его частотных составляющих, т. е. на все большее изменение тембра звучания. Такое выпадание при одноканальной передаче будет одинаковым для обоих ушей слушателя.

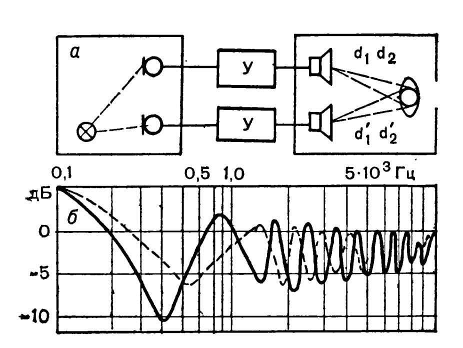


Рис. 10.20. Схема восприятия стереосигналов (*а*) и их частотные характеристики (*б*) для каждого из ушей слушателя при $\Delta\tau=1$ мс

При передаче звучания одного источника с помощью двухканальной стереофонической системы будет наблюдаться подобная же ситуация с единственным отличием, заключающимся в том, что сигналы, принятые каждым из микрофонов, будут суммироваться не электрически, а акустически при приеме их во вторичном помещении. В этом случае выражение (6.5), согласно рис. 10.20, *а*, изменит свою форму и для каждого из ушей слушателя представится равенствами:

$$\left.\begin{aligned} A_1' &= \sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2\cos\frac{\omega\left(\Delta d_1 - \Delta d_1'\right)}{c_0} + A_2^2}\,; \\ A_2' &= \sqrt{A_1^2 + 2A_1A_2\cos\frac{\omega\left(\Delta d_2 - \Delta d_2'\right)}{c_0} + A_2^2}\,, \end{aligned}\right\} \qquad (10.31)$$

где $\Delta d_1'$ и $\Delta d_2'$ — разница в расстояниях от каждого уха до левого и правого громкоговорителя системы.

Интервалы между пиками на частотной характеристике в этом случае, по подобию с равенством (6.8), определятся как

$$\left.\begin{aligned} \Delta f_1 &= \frac{(2n+1)\,c_0}{2\left(\Delta d_1 - \Delta d_1'\right)} \\ &\text{и} \\ \Delta f_2 &= \frac{(2n+1)\,c_0}{2\left(\Delta d_2 - d_2'\right)}\,. \end{aligned}\right\} \qquad (10.32)$$

Для стереофонических систем амплитуды A'_1 и A'_2 сигналов, принятых микрофонами системы, как правило, всегда значительно отличаются друг от друга. Кроме того, как следует из выражений (10.31), амплитуды суммарных сигналов, принимаемых каждым ухом, будут неодинаковыми. Это означает, что глубина провалов, обусловленных интерференционными искажениями, будет не только меньше тех максимально возможных искажений, которые свойственны одноканальной передаче (см. формулу (6.7)), но и различной для ушей слушателя.

В силу различия знаменателей дроби в выражениях (10.32) провалы на частотной характеристике в восприятии каждого уха не будут совпадать, что, как показывают исследования Г. К. Клименко, может привести к взаимной компенсации. Это видно по кривым рис. 10.20, *б*, на котором сплошной и прерывистой линиями показан ход характеристики суммарного сигнала, воспринимаемого каждым ухом. Смещение этих кривых, а также ослабление интерференционных искажений по мере повышения частоты сигнала способствуют улучшению восприятия тембра звучания при стереопередачах. Этому же способствует и меньшее маскирующее действие различных источников звука, которое обусловлено большей их разделимостью по направлению.

Было показано [13], что экранирующее действие головы слушателя при двухканальной передаче значительно ослабляют интерференционные искажения. Это относится не только к прямым, но и к отраженным сигналам. Каждый отраженный сигнал вследствие различия во времени его прихода к микрофонам системы (см. рис. 10.13) и экранирующего действия головы слушателя воспринимается ушами с соответственными различиями. Это не только уменьшает искажения при стереофонической передаче по сравнению с монофонической, но и обогащает тембральную окраску звучания, связывает ее с акустической обстановкой зала так, как это имеет место при восприятии звучания в естественных условиях.

Таким образом, различие в амплитудах и во временны́х структурах канальных сигналов стереофонических систем, отличающее стереофонические передачи от монофонических, значительно улучшает передачу тембров звучаний и способствует большей связи этих звучаний с акустической обстановкой первичного помещения.

Глава 11.

ВЫБОР СТЕРЕОФОНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СТЕРЕОСИГНАЛОВ

11.1. Общие замечания по обработке стереофонических сигналов

В принципе звучания, передаваемые высококачественной стереофонической системой, по их восприятию не должны отличаться от натуральных. Это означает, что они помимо ряда показателей, характерных для хороших монофонических звучаний речи и музыки, должны обладать еще и определенными локализационными свойствами. Стереосистемы должны по возможности полно обеспечивать неискаженную передачу пространственного расположения и перемещения каждого из источников звука как по фронту, так и по глубине, а также передачу объемности реверберационного процесса, сопровождающего данное звучание.

Как следует из главы 10, существующие стереосистемы не в состоянии полностью передать пространственное размещение ни реальных, ни фиктивных — обусловленных отражениями — источников звука. Однако оказывается, что в этом часто и нет острой необходимости. Ведь даже в изобразительной части кинофильма нет стремления показать полную картину действительных событий, которую видит наблюдатель в реальных условиях. В ней даются только отдельные, выборочные сцены, так сформированные, чтобы, отобразив художественный замысел, они оказали бы на зрителя высокое эмоциональное воздействие. Очевидно, и особенности стереофонической передачи должны быть подчинены прежде всего решению задачи эстетического плана. В зависимости от характера этой задачи те или иные свойства стереофонии могут использоваться раздельно или совместно — главное, чтобы они усиливали художественную выразительность каждой данной сцены или стереопрограммы. Так, поставленная задача требует ряда мер по предварительной и оперативной обработке передаваемых сигналов.

Предварительная обработка сигнала определяется прежде всего выбором конкретной системы передачи. Такой выбор не прост, если иметь в виду, что все существующие стереофонические системы привносят в процесс передачи значительные искажения. Стремясь их уменьшить, очевидно, важно решить вопрос о количестве каналов передачи, типе системы и ее разновидности, о возможности комбинированного использования нескольких систем.

Важно осуществить правильный выбор помещения для звукопередачи. Оно должно отвечать высоким требованиям и по своим размерам и по акустическим условиям. Акустические условия в нем должны быть оптимальными для данного вида программы по таким параметрам, как диффузность поля, время реверберации, его частот-

ная характеристика и временно́й спектр. Коррекцию акустических условий желательно выполнять средствами самой студии, так как использование ревербераторов усложнило бы звукопередачу и снизило бы ее качество.

При стереофонических передачах еще большее значение, чем при монофонических, приобретает размещение источников звука как относительно поверхностей помещения, так и относительно друг друга. От этого зависят передача движения и пространственное расположение отдельных кажущихся источников звука или всего оркестра и звуковые планы его групп и солирующих инструментов.

Качество стереофонических передач очень зависит от выбора типов микрофонов, участвующих в передачах, и их размещения относительно источников звука. Поэтому требуется заранее решить вопрос о том, сколько и каких микрофонов нужно отобрать для звукопередачи и как правильно разместить их для получения хороших результатов. При этом нужно иметь в виду использование комбинированных систем и параллельного включения на вход каждого канала нескольких микрофонов, работающих на небольшие группы источников.

Другой важный вид обработки стереофонических сигналов связан с их оперативным управлением. Однако назначение такого управления и его методы заметно отличаются от случая монофонических передач. Управление должно выполняться так, чтобы изменения параметров звуковых сигналов в каналах, улучшающих пространственность звучания, не были бы в ущерб другим качественным показателям передачи. Основные параметры, подвергающиеся оперативному управлению, — это уровни сигналов в каналах и их частотная характеристика. При этом управление уровнями может осуществляться электрическим или одним из акустических методов, например методом поворота микрофонов (см. параграф 11.7).

11.2. Выбор стереофонической системы

Двухканальная стереофоническая система, наделяя передаваемые сигналы свойствами, связанными с пространственным восприятием звука, заметно повышает качество звукопередачи. Однако возможности ее ограничены, и не только появляющимися при передаче искажениями. С помощью двух излучателей слушатели в состоянии воспринять пространственную картину только в плоскости, в которой размещены действительные источники звука, причем угол приема КИЗ даже для ближайших к воспроизводящей системе слушателей будет всегда меньше 180°. Увеличение числа каналов приводит к дальнейшему повышению качества звукопередачи, так как снижаются пространственные искажения и увеличивается угол приема. Примером тому служит *квадрафоническая система,* у которой этот угол расширяется до 360°.

Практика показывает, что при увеличении числа каналов качество звукопередачи повышается все медленнее, тогда как реализация многоканальных систем становится все более трудной. Поэтому

там, где многодорожечную запись получить просто, например на магнитной ленте, число каналов выбирается равным четырем (квадрафония) или пяти (кинематограф). Там же, где это осуществить трудно, например в радиопередачах, число каналов ограничивают двумя. Выбор же системы следует осуществлять исходя из того, насколько для каждой из них велики локализационные искажения. Это легко установить, сравнивая варианты систем *AB*, *MS* и*XУ*.

Рассматривая искажения по глубине и фронту для вариантов *I, II, III* системы *AB* (рис. 10.6, 10.10, 10.11), можно убедиться, что оптимальные расстояния $\frac{y}{l}$ для них будут равны соответственно 0,4; 0,7 и 0,9. При этом искажения по глубине составят 7,4 и 5 дБ, а искажения по фронту — 30, 20 и 25%. Отсюда следует, что лучшим в системе *AB* является вариант *II* с кардиоидными микрофонами, похуже — вариант *III* и самым плохим — вариант *I* с микрофонами ненаправленного типа.

Так как локализационные искажения в системах *XУ* и *MS* повариантно одинаковы или близки, оптамальные значения $\frac{y}{l}$ для вариантов *I, II, III* (см. рис. 10.8, 10.9 и 10.12) будут равны 0,5; 0,6; 1,0 при искажениях, по глубине близких к 5, 10 и 6 дБ, и искажениях по фронту, соответственно равных 20, 45 и 30%. Следовательно, лучшим для систем *XУ* и *MS* является вариант *I*, близкий к варианту *II* системы *AB*, однако большая изогнутость кривых $\frac{x'}{l'} = f\left(\frac{x}{l}\right)$ указывает на свойственные ему искажения скорости перемещения КИЗ. Для варианта *II* эта скорость мала, и фронтальные искажения недопустимо велики. В случае же варианта *III*, наоборот, скорость КИЗ непомерно велика, возрастает критичность к изменению расстояния $\frac{y}{l}$, и, когда оно становится малым, возможны случаи возвратного движения КИЗ (см. рис. 10.12).

Следует указать на одно преимущество систем *MS* и *XУ* по сравнению с системой *AB*. Они, как системы интенсивностные, обладают свойством совместимости канальных сигналов и позволяют при перезаписи получить хорошую монофоническую фонограмму. В интенсивно-временно́й системе *AB* временны́е сдвиги канальных сигналов при их соединении на одной фонограмме создают интерференционные искажения.

Сравнение различных вариантов систем *AB, XУ* и *MS* приводит к заключению, что лучшим является вариант *II* (с кардиоидными микрофонами) системы *AB*. Несколько уступает ему по качеству вариант *I* системы *XУ* и *MS*. Возможно также использование и варианта *III* системы *AB*.

Так как фронтальная протяженность передаваемой звуковой картины (игровой сцены, оркестра) и величина возникающих искажений могут быть большими, то оказывается, что передачу с помощью одного стереомикрофона или нескольких микрофонов системы *AB* практически осуществить невозможно. В таких случаях рекомендует-

ся использовать систему *AB* (лучше вариант *II*) вместе с одним или несколькими стереомикрофонами системы *XY* или *MS* (лучше вариант *I*). Если же при совместном использовании систем замечаются такие недостатки, как нарушения музыкального ансамбля, прозрачности звучания и др., то устранить это можно, включая в цепь каждого из каналов системы одновременно несколько рационально рассредоточенных микрофонов.

Таким образом, для создания бо́льших возможностей управления сигналами в целях повышения качества передач следует выбирать комбинированную систему, объединяющую в себе лучшие варианты системы *AB* и *XY* или *MS*. Число каналов этой системы не должно быть более пяти, но может быть и меньше, если многоканальные системы технически трудно реализуемы. Система может быть многомикрофонной с примерно одинаковым распределением микрофонов по каналам.

11.3. Выбор ателье для стереофонических передач

Акустические условия в первичных помещениях оказывают на качество стереофонических передач заметно бо́льшее влияние, чем на качество передач монофонических. Это объясняется тем, что стереосистемы позволяют локализовать в пространстве ряд КИЗ, различать их по направлениям вне зависимости от того, передают они положение действительных источников звука или фиктивных источников, обусловленных отражениями. Разнонаправленный приход отраженных сигналов делает реверберационный процесс, передаваемый из первичных помещений, пространственным и похожим на естественный. Такую способность стереосистем, особенно при передаче музыкальных программ, звукорежиссеры считают даже более важной, чем локализацию действительных источников звука. Кроме того, частотное различие основного и отраженного сигналов, обусловленное частотно-зависимым звукопоглощением, вместе с запаздыванием последних из сигналов делает тембры звучания инструментов и голосов более мягкими и привычно естественными. Временна́я же неравномерность отражений на начальном этапе затухания вместе с приходом их с различных направлений создает более яркое слуховое впечатление о размерах первичного помещения.

Высказанные положения указывают на необходимость при стереофонических передачах бережно сохранять те оптимальные акустические условия в ателье, которые уже были сформулированы при выборе ателье для одноканальных передач (см. параграфы 8.3, 8.4) с учетом некоторых изменений, связанных с технологическими различиями в этих двух видах передач.

Прежде всего это относится к оптимальному времени реверберации. Если учесть, что количество микрофонов, задействованных при стереопередачах, значительно больше, чем это бывает при подобных же монофонических передачах, то оптимальное время реверберации в первом случае при одинаковых по объему ателье должно

быть снижено на 20÷30% по сравнению со вторым (см. параграф 10.6).

Использование большего числа микрофонов, а также стремление при стереофонических передачах уменьшить возможность приема каждым микрофоном сигналов от соседних исполнителей заставляют размещать их посвободнее. Это, а также большая заметность акустических перегрузок при стереопередачах приводят к требованию некоторого увеличения объема ателье. Если же учесть, что для установления баланса уровней сигналов в каналах системы нужно иметь большую свободу в перемещении микрофонов при расстановке их в ателье, то становится очевидной важность наличия в нем диффузного звукового поля.

Следует отметить также, что высококачественная стереофоническая передача музыки требует большего внимания к тому, чтобы акустические условия в ателье как можно лучше соответствовали типу ансамбля и характеру музыкального произведения.

11.4. Размещение исполнителей при стереофонических передачах

При синхронной съемке изображения, так же как и при трансляции концертов, драматических и музыкальных спектаклей, стереофоническая запись или передача должны осуществляться при таком размещении исполнителей, какое необходимо для характеристики их действия в данной сцене или традиционно принято для данного вида исполнения. Заранее заданное расположение исполнителей часто не является оптимальным для стереофонических передач. Однако его нельзя изменить, и происходящее снижение качества звучания приходится компенсировать особым размещением микрофонов.

Если стереофоническая запись или передача проводится специально, исполнителей располагают относительно друг друга так, как это подсказывается принципиальными особенностями стереофонического метода, что особенно важно при передаче симфонической и эстрадной музыки. В первом случае для более слитного звучания вместо рассредоточения первых и вторых скрипок вдоль всего фронта оркестра рекомендуется сконцентрировать их, с одной стороны, с расширением занимаемой ими площади в глубину (рис. 11.1). С другой стороны, рекомендуется разместить еще две группы струнных инструментов — альтов и виолончелей. Такое расположение инструментов позволяет разделить в пространстве звучания более высокого и низкого регистров. Все остальные группы инструментов располагаются по глубине в зависимости от их мощности, например так, как это показано на схеме рис. 11.1, применяемой в Берлинском радиодоме. При одновременной передаче звучания оркестра и хора их взаимное расположение обычно соответствует схеме рис. 11.2 (Всесоюзная студия грамзаписи). Размещение исполнителей при записи и передаче эстрадной и танцевальной музыки определяется новым подходом к ее восприятию. Если при слушании симфонической музыки на первый план выступает мелодический рисунок музыкаль-

ного произведения, подаваемого средним или общим звуковым планом, то для этой музыки основой становятся ритмичность и четкая разделимость звучания отдельных музыкальных групп и инструментов, а также применение крупных и сверхкрупных звуковых планов. Этот вид музыки привлек внимание и вызвал интерес у слушателей не

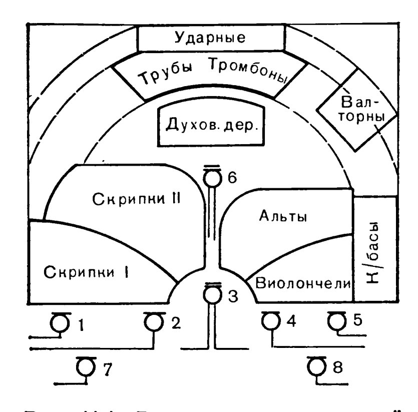


Рис. 11.1. Размещение исполнителей при стереофонической передаче симфонической музыки

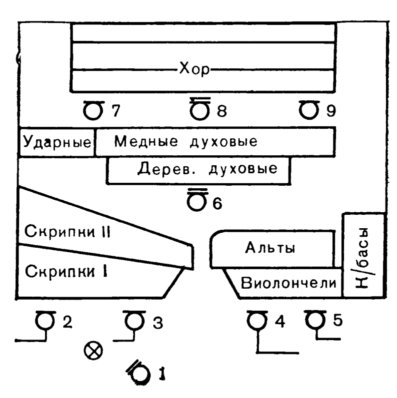


Рис. 11.2. Размещение симфонического оркестра и хора при стереофонической передаче

только новым подходом к передаче музыкальных звучаний, но и широким использованием технических средств, позволяющих по-новому передать звучания отдельных инструментов и ансамбля в целом. Все это требует особого решения вопроса о размещении исполнителей.

Отдельные инструментальные группы эстрадного оркестра стремятся возможно лучше акустически изолировать друг от друга. В концертных передачах это достигается тем, что при уплотненном расположении исполнителей, играющих на одинаковых инструментах, каждая такая группа отделяется от других на возможно большее расстояние. В случае радиопередачи или записи эстрадной музыки разделения групп добиваются с помощью ограждения их щитами, обработанными эффективными звукопоглощающими материалами (рис. 11.3). Особенно тщательно отделяется ритм-группа, и не только от других групп, но и от отражающих звук стен помещения. Если записывается звучание всего оркестра, струнная группа располагается в отрыве от групп ударных и духовых инструментов с возможно большей ее акустической изоляцией. Однако это не всегда удается, а поэтому полную акустическую изоляцию в целях

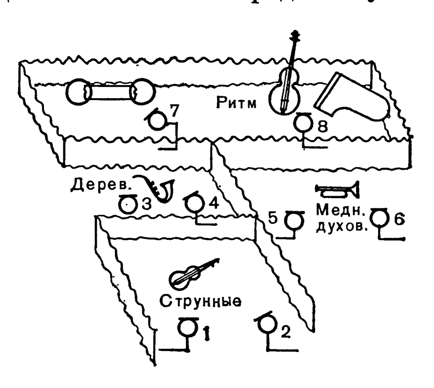


Рис. 11.3. Пример размещения инструментов и их групп при стереофонической записи или радиопередаче эстрадной музыки

получения максимальной четкости звучапия оркестра стремятся создать путем раздельной стереофонической записи звучаний групп инструментов с последующим сведением их на одну такую же фонограмму.

11.5. Определение расстояния от исполнителя до линии микрофонов при стереопередачах

Для каждой из стереофонических систем выбор расстояния от исполнителя до линии микрофонов ограничивается искажениями в передаче движения по глубине и по фронту. Минимальное расстояние определяется допустимыми искажениями первого типа, а максимальное — искажениями второго типа. Для системы *AB* оба эти вида искажений, как было показано автором [20], связаны с амплитудным значением функции корреляции B_τ двух сигналов, создаваемых в ее каналах. Наличие такой связи важно потому, что она разрешает определять эти искажения объективным методом по снятой коррелограмме. Вместе с тем графики, выражающие эту зависимость, позволяют найти такие расстояния между исполнителем и линией микрофонов, при которых искажения того или другого вида будут не больше заданных. По тем же графикам определяется и величина коррекции локализационных искажений в случае, если это расстояние выбрано при искажениях, превышающих допустимые.

Рис. 11.4 отвечает применению варианта *II* системы *AB*. На нем по оси абсцисс отложены приведенные значения корреляционной функции B_τ, представляющей собой отношение амплитуд корреляционной функции, измеренных при положении исполнителя на оси системы $\left(\frac{x}{l}=0\right)$ и перед одним из микрофонов $\left(\frac{x}{l}=1\right)$. Кривая *1* на нем выражает зависимость B_τ от величины искажений в передаче движения по глубине (N_c), а кривая *2* — зависимость B_τ от величины относительного смещения $\frac{x'}{l'}$ КИЗ, определяемого только слуховым восприятием. Если же учесть корректирующее действие изображения, равное для случая речевого сопровождения (см. параграф 10.7) $20\div30\%$, то зависимость $B_\tau=f\left(\frac{x'}{l'}\right)$ будет определяться кривой *2′* и *2″*. Наконец, пользуясь графиком рис. 10.11, можно определить связь между B_τ и $\frac{y}{l}$, которая выражена на рис. 11.4 кривой *3*.

Если судить по рисунку и считать искажения в передаче движения по глубине допустимыми при $N_c=6\div7$ дБ, а искажения по фронту $\frac{\Delta x'}{l'}=20\%$ (точки на кривых *1* и *2*), то в отсутствии изображения пределы перемещения исполнителя вдоль оси ординат определятся разностью двух значений $\frac{y}{l}=0{,}4$ и $\frac{y}{l}=0{,}65$ (точки на кривой *3*). При учете корректирующего действия изображения вто-

рое из этих значений увеличивается до 1,0 (точка на кривой 2″). В первом случае ширина рабочей зоны перемещения исполнителя составит $\frac{\Delta y}{l} = 0{,}25$, а во втором — 0,6.

При применении варианта *III* системы *AB* связь между значением корреляционной функции B_τ и локализационными искажениями

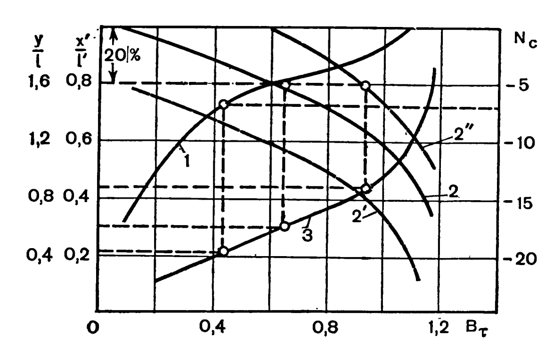


Рис. 11.4. Связь корреляционной функции B_τ с искажением глубинного (*1*) и фронтального типов при корректирующем влиянии изображения (*2′*, *2″*) и без него (*2*) для варианта *II* системы *AB*

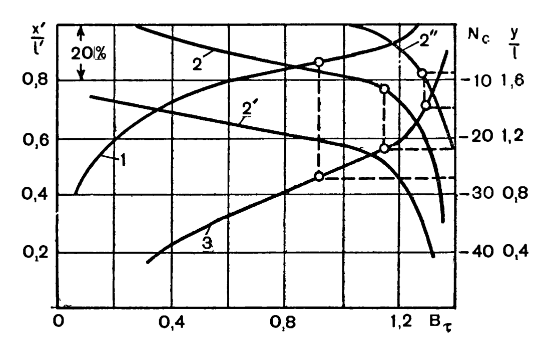


Рис. 11.5. Связь корреляционной функции B_τ с искажением глубинного (*1*) и фронтального типов при корректирующем влиянии изображения (*2′*, *2″*) и без него (*2*) для варианта *III* системы *AB*

будет выражаться кривыми рис. 11. 5, имеющими те же обозначения, что и на рис. 11.4. При тех же значениях локализационных искажений $\left(N_c = 6 \div 7 \text{ дБ и } \frac{\Delta x'}{l'} = 20\%\right)$ рабочая зона исполнителя будет лежать в пределах от 0,9 до 1,1 и от 0,9 до 1,5 соответственно для случаев, когда изображения нет или оно имеется, а ширина ее будет 0,2 и 0,7.

Небольшая ширина рабочей зоны крайне затрудняет перемещение исполнителя во время передачи. В условиях радиовещания эту зону можно расширить смещением ее верхней границы, имея в виду, что появляющиеся при этом искажения фронтального типа легко

устранить при прослушивании расширением базы громкоговорителей. К тому же такое расширение улучшает передачу акустической обстановки первичного помещения. Это следует из гистограмм (рис. 11.6), полученных при прослушивании в заглушенном помещении речевой двухканальной передачи, которая велась из помещения, имеющего $V = 120$ м³ и $T = 1{,}3$ с. На оси абсцисс отложена ширина базы приема $2l'$, а по оси ординат — процент экспертов, отдающих предпочтение стереосистеме по сравнению с моносистемой. Верхняя граница гистограмм построена по показаниям опытных экспертов, промежуточная — по показаниям малоопытных экспертов.

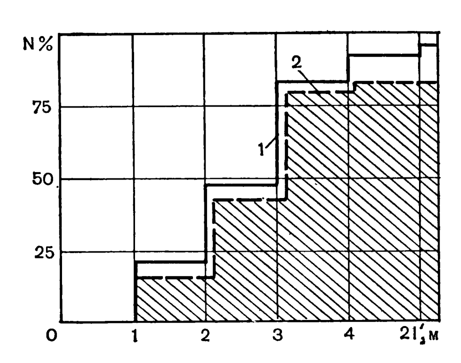


Рис. 11.6. Влияние ширины базы звуковоспроизведения на передачу акустической обстановки первичного помещения

Как видно из рис. 11.6, расширение базы звуковоспроизведения, увеличивая угол приема отраженных сигналов первичного помещения, улучшает восприятие акустической обстановки. Это доказывается и квадрафонической передачей, когда благодаря расширению угла приема до 360° акустическая обстановка первичного помещения передается наиболее полно. Опыт показал также, что наибольший эффект по акустической обстановке наблюдается при расстояниях источник — линия микрофонов от 1,0 до 1,5 м $\left(\frac{y}{l} = 1{,}3 \div 2\right)$.

Увеличение этого расстояния сначала ведет к заметному нарастанию пространственности, потом к постепенному ее спаду. Такие изменения восприятия акустической обстановки объясняются тем, что при малом $\frac{y}{l}$ эквивалентная реверберация $T_{экв}$ мала и почти не воспринимается. Увеличение $\frac{y}{l}$ влечет за собой быстрый рост $T_{экв}$ и, несмотря на уменьшение угла приема θ, увеличивает пространственность. Дальнейшее удаление исполнителя, когда $T_{экв}$ изменяется мало, уменьшение угла приема приводят к уменьшению эффекта пространственности. Очевидно, конкретные расстояния будут зависеть еще от времени реверберации первичного помещения и вида программы.

Материалы данного параграфа позволяют сделать ряд выводов.

1. Зрительная коррекция и расширение базы звуковоспроизведения позволяют с помощью системы *АВ* достаточно правильно передать пространственное положение действительных источников звука, если расстояние $\frac{y}{l}$ от исполнителя до линии микрофонов для вариантов *II* и *III* выбирается соответственно в пределах 0,4—1,0 и 0,9—1,6.

2. Выбор наибольших из этих расстояний позволяет удовлетворительно передать акустическую обстановку первичного помещения. Для оптимальной ее передачи необходимо $\frac{y}{l}$ выбирать равным $1,3 \div 2,0$.

3. Изменяя $\frac{y}{l}$, звукорежиссер в зависимости от характера творческой задачи может подчеркнуть фронтальное или глубинное положение действительного источника звука, усилить пространственность звучания.

4. При музыкальных стереопередачах по системе *AB* требования к выбору рабочих расстояний могут быть смягчены. Требования к системам *XY* и *MS*, так как локализационные искажения для них больше, будут более жесткими, а результаты менее качественными.

11.6. Общие рекомендации по размещению микрофонов при стереопередачах

Качество стереофонических передач зависит от размещения микрофонов относительно исполнителей. Это размещение связано с характером источника звука (речь, музыка), с особенностями передаваемой сцены, видом ансамбля и музыкального произведения, с акустикой ателье. В зависимости от творческой задачи при размещении микрофонов следует исходить из того, нужно ли возможно полное воссоздание всей совокупности стереофонических признаков, таких, как пространственность и эффект движения источников звука, естественность тембра и прозрачность звучания, акустическая обстановка первичного помещения и впечатление о его размерах, либо достаточно передать только некоторые из них. Задача может сводиться и к подчеркиванию некоторых из признаков, позволяющих получать новые звуковые эффекты. Обработка стереофонических сигналов для звукорежиссера превращается, таким образом, в активный поиск решений, отвечающих его художественному замыслу. Знание же закономерностей, с помощью которых можно управлять пространственными признаками сигналов, должно помогать ему в этом.

При размещении микрофонов комбинированной системы следует руководствоваться данными рис. 10.6 и 10.8. Как видно из них, наименьшие искажения по глубине для системы *AB* будут при размещении исполнителя в крайних точках перед микрофонами, а для систем *MS* и *XY* — при его нахождении на оси системы. Следовательно, простейшим случаем флангового расположения микрофонов при двухканальной передаче будет: два обычных микрофона по системе *AB* — на краях звуко-

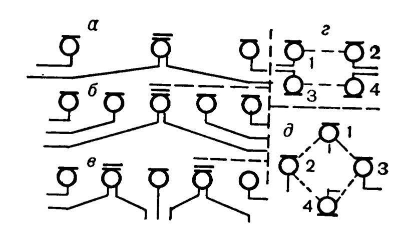


Рис. 11.7. Варианты размещения микрофонов при обычных стереофонических (*а*, *б*, *в*) и квадрафонических (*г*, *д*) передачах

вой панорамы и один стереомикрофон — в середине (рис. 11.7,*а*). При большой протяженности звуковой панорамы могут быть варианты с двумя дополнительными обычными или стереофоническими микрофонами, расположенными в промежутках между каждым из основных и центральным стереомикрофоном (рис. 11.7,*б* и *в*).

Два первых варианта могут быть приняты при двухканальной передаче, а второй и третий при числе каналов 3. Для пятиканальной передачи к вариантам *б* и *в* следует прибавить по одному микрофону на краях. Во всех этих случаях обычные микрофоны работают на соответствующие каналы системы *AB*, а сигналы с двух выходов стереомикрофонов подмешиваются к сигналам пары соседних с ними обычных микрофонов.

Конечно, размещение микрофонов по фронту в соответствии с любым из вариантов должно быть связано с положением групп исполнителей, например так, как это показано на рис. 11.1. При этом микрофоны, работающие на один канал, могут обслуживать только одну группу инструментов (*1*, *2*) или несколько малых групп (*3*, *4*). Расстояние их от исполнителей должно быть небольшим (см. параграф 11.3).

Очевидно, размещая микрофоны только вдоль фронта, нельзя получить при передаче музыкальный баланс для оркестра или нужную перспективу для перемещающегося по глубине источника звука. Чтобы устранить этот недостаток, используют одиночные стереомикрофоны (рис. 11.1) или цепочку микрофонов (рис. 11.2), собранному по любому из вариантов рис. 11.7, располагая их по глубине в две-три линии. Это делается так, чтобы наилучшим образом сбалансировать звучания глубинных и фронтальных источников. Микрофоны второй и третьей линий подключаются к каналам в соответствии с их положением в зонах системы. Для двухканальной системы таких зон две — левая и правая, для трехканальной добавляется еще центральная, а для пятиканальной рядом с нею появляются еще полулевая и полуправая зоны.

Приближение микрофонов к источникам звука позволит не только правильно передать фронтальное положение последних, но и уменьшить неуправляемое время реверберации, которое зависит от типа и количества микрофонов, а также от их размещения относительно исполнителей (см. параграф 10.6). Для управления же временем реверберации и передачей акустической обстановки первичного помещения по рекомендациям параграфа 11.5 в нескольких метрах от передней линии исполнителей устанавливают специальные микрофоны (*7* и *8* на рис. 11.1). Лучше всего акустическая обстановка передается квадрафонической системой с размещением микрофонов по схеме рис. 11.7, *г* и *д*.

Стереофоническая передача современной эстрадной музыки строится на новой принципиальной основе. Главным в ней считается полнота эстетической информации, которая достигается неупорядоченным использованием отдельных составляющих стереофонического эффекта с подачей звучания различных инструментов в разных и часто меняющихся планах. В связи с этим рекомендации, сделан-

ные на основе закономерностей, обеспечивающих передачу стереопанорамы, близкой к реальной, в этом случае не могут быть действительными.

Эффектность звучания этой музыки достигается путем использования тех же особенностей стереопередачи и теми же техническими средствами, но только с ориентацией на моду, вкус и творческое воображение звукорежиссера. Строгих рекомендаций по размещению микрофонов в этом случае не может существовать, общие же указания были уже рассмотрены (см. параграф 11.4).

11.7. Некоторые схемы размещения микрофонов при речевых стереофонических передачах

Опыт проведения стереопередач и стремление избежать свойственных им искажений при одновременном упрощении микрофонной системы и ее управлении привели к появлению большого количества рекомендуемых схем размещения микрофонов. Они составлялись с учетом не только технических возможностей стереосистем, но и личных вкусов звукорежиссеров. В связи с этим схемы, которые приводятся ниже, следует рассматривать как примеры, знакомство с которыми может помочь в поиске оптимального решения каждой новой творческой задачи.

При передаче речевых звучаний многие звукорежиссеры, работающие над созданием широкоформатных фильмов, вопреки установившимся нормативам, предпочитают вместо пяти микрофонов использовать для стереофонической записи только три микрофона. Такие случаи иллюстрируются примерами, приведенными на рис. 11.8, *а* и 11.8 *б*. В примере рис. 11.8 *а* расстановка микрофонов такова, что стереосистема, передавая общую акустическую обстановку, обеспечивает четкую локализацию звучания наиболее удаленных друг от друга источников звука. Особенностью же схемы рис. 11.8, *б* является то, что микрофоны, как и исполнители, размещаются в виде треугольника, но те из них, которые обслуживают левого и правого исполнителей, поменялись местами. Это сделано для лучше-

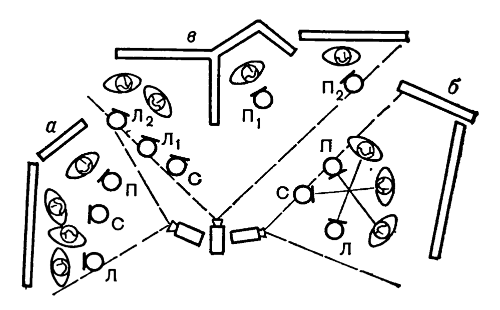


Рис. 11.8. Примеры размещения микрофонов при стереофонической записи речи в условиях киносъемки: *Л*, *С*, *П* — левый, средний, правый микрофоны

го сочетания характеристик направленности речевого аппарата и однонаправленных микрофонов, используемых в данной схеме. В более сложных случаях (см. рис. 11.8, *в*) применяют пятиканальную систему с таким же количеством микрофонов при возможно близком размещении их к каждому от исполнителей. Если один из исполнителей передвигается, то для него устанавливают свою систему микрофонов.

11.8. Управление звуковым балансом при стереофонии

Последующая обработка стереосигналов, так же как и описанная выше предварительная, довольно сложна. Ее можно разделить на несколько стадий, связав каждую с управлением одним из таких параметров стереофонических сигналов, как звуковой и стереофонический баланс, ширина и глубина стереопанорамы, акустическая обстановка первичного помещения.

Большое число действующих источников и приемников звука требует от звукорежиссера прежде всего тщательной регулировки уровней сигналов во всех звеньях тракта. Такая регулировка выполняется на первой стадии с помощью индивидуальных регуляторов уровней в цепи каждого из микрофонов, число которых может достигать 32. Ее цель — выравнивание громкостей одинаковых источников звука, работающих на каждый микрофон. На второй стадии управления уровнями, пользуясь индивидуальными и групповыми регуляторами, следует осуществить правильный подбор уровней сигналов, принимаемых группами микрофонов, работающих на каждый канал, что необходимо для общей балансировки громкости источников. Это особенно важно при музыкальных стереопередачах, когда нужно обеспечить возможно полный музыкальный баланс.

Выполняя операции по управлению звуковым балансом, нужно иметь в виду, что для правильной передачи стереопанорамы обязательно требуется идентичность каналов, или так называемый *стереобаланс*. Она обеспечивается равенством уровней усиления канальных сигналов и подобием их частотных характеристик. При нарушении этих требований КИЗ смещается в сторону того канала, где усиление больше, а частотная характеристика хуже.

Таким образом, изменяя уровни сигналов в цепи отдельных микрофонов или их групп в целях получения звукового баланса, следует сохранять баланс стереофонический, не вносить различия в усиление канальных сигналов. Вот почему для управления динамическим диапазоном в процессе передач рекомендуется пользоваться объединенным регулятором уровней, одинаково изменяющим усиление в каналах.

11.9. Возможности управления шириной стереопанорамы

Устранить искажения в передаче движения по глубине и по фронту можно, если в процессе стереопередачи применить специаль-

ный регулятор, вносящий строго определенное изменение уровней сигналов одновременно в цепи каждого канала системы [18].

Для исключения искажений по глубине необходимо, чтобы суммарный уровень сигналов не изменялся при движении исполнителя параллельно линии микрофонов. Это условие можно выразить в виде равенства:

$$e_1^2 + e_2^2 = e_0^2 = \text{const}, \tag{11.1}$$

где e_1 и e_2 — ЭДС на выходе каждого из каналов системы.

Условие неискаженной передачи фронтального движения выражается кривыми рис. 10.2 или соответствующей им эмпирической формулой:

$$N_\text{р} = 20 \lg \frac{e_2}{e_1} = 2a \operatorname{sh}\left(b \frac{x'}{l'}\right). \tag{11.2}$$

Решая совместно уравнения (11.1) и (11.2), можно получить выражения, которые определяют изменение ЭДС на выходе микрофонов при отсутствии локализационных искажений. Эти выражения таковы:

$$\left.\begin{aligned} \frac{e_1}{e_0} &= \left[10^{0{,}2a \operatorname{sh}\left(b \frac{x'}{l'}\right)} + 1\right]^{-\frac{1}{2}}; \\ \frac{e_2}{e_0} &= \left[10^{-0{,}2a \operatorname{sh}\left(b \frac{x'}{l'}\right)} + 1\right]^{-\frac{1}{2}}. \end{aligned}\right\} \tag{11.3}$$

Если коэффициенты a и b выбрать отвечающими лучшим местам для слушателей в условиях кинотеатра или домашнего прослушивания, которые определяются расстоянием $\frac{y''}{l'}$ равным от 4 до 6 в первом случае и $\frac{y''}{l'} = 2$ — во втором, то по формулам (11.3) можно построить пары соответствующих кривых (*1*, *1'*, *2*, *2'* и *3*, *3'*), изображенных на рис. 11.9. В реальных же системах, например в системе *AB*, для лучшего варианта *II* при расстоянии между ними и исполнителем $\frac{y}{l}$, равном 0,1; 0,3; 0,5, эти изменения происходят, согласно выражениям (10.18), по кривым *4*, *4'*, *5*, *5'* и *6*, *6'*. Находя разности ординат точек при одних и тех же значениях $\frac{x'}{l'}$ для кривых первой и второй группы, выражающих необходимое и действительное изменение сигналов в системе, можно получить кривые (рис. 11.10) для регулятора уровней, исключающего локализационные искажения.

Для управления стереопанорамой кроме электрического можно использовать акустический способ, в котором соответствие уровней кривым рис. 11.9 достигается путем изменения формы характеристик направленности микрофонов.

Учитывая, что согласно равенству (10.3):

$$e_1 = \kappa p_1 = k p_0 \Phi(\theta_1) \cos\theta_1;$$

$$e_2 = \kappa p_2' = k p_0' \Phi(\theta_2) \cos\theta_2 \text{ и } e_0 = k p_0,$$

условие исключения искажений по глубине можно выразить равенством

$$\Phi^2(\theta_1)\cos^2\theta_1 + \Phi^2(\theta_2)\cos^2\theta_2 = 1. \qquad (11.4)$$

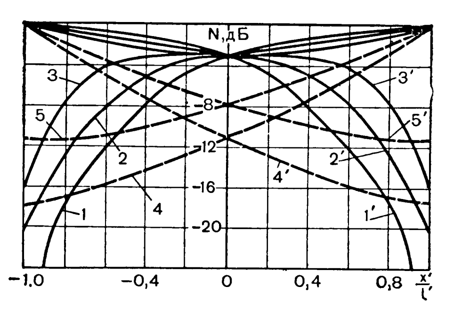


Рис. 11.9. Кривые необходимого и действительного изменения уровня сигнала правого и среднего микрофонов в каналах системы *AB* варианта *II* при разных значениях y/l и y''/l''

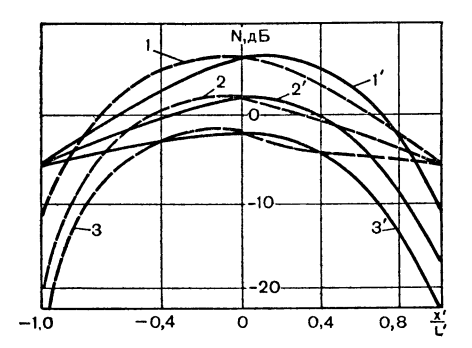


Рис. 11.10. Кривые коррекции для двухканальной системы *AB* варианта *II* при $y'/l''=6$ и $y/l=0{,}3$ (*1*, *1'*); $y/l=0{,}5$ (*2*, *2'*) и $y/l=1{,}0$ (*3*, *3'*)

Правильная передача по фронту будет при равенстве перемещений действительного и кажущегося источника, то есть при $\frac{x}{l} = \frac{x'}{l'}$. Переходя к угловым величинам, из рис. 10.5 следует, что

$$\frac{x}{l} = 1 - \frac{\operatorname{tg}\theta_1}{\operatorname{tg}\theta_{\text{ср}}} = 1 - \operatorname{tg}\theta_1 \operatorname{ctg}\theta_{\text{ср}},$$

а исходя из наклона кривой рис. 10.10, можно написать, что

$$N_{\text{р}} = 20\lg\frac{e_2}{e_1} = 1{,}5\frac{x'}{l'} = 1{,}5\frac{x}{l} = 1{,}5(1 - \operatorname{tg}\theta_1 \operatorname{ctg}\theta_{\text{ср}}). \quad (11.5)$$

Совместное решение уравнений (11.4) и (11.5) дает такой результат:

$$\left.\begin{aligned}\Phi(\theta_1) &= \frac{1}{\cos\theta_1}\left[10^{1,5\,(1-\operatorname{tg}\theta_1\operatorname{ctg}\theta_{\text{ср}})}+1\right]^{-\frac{1}{2}}\\ &\text{и}\\ \Phi(\theta_2) &= \frac{1}{\cos\theta_2}\left[10^{-1,5\,(1-\operatorname{tg}\theta_2\operatorname{ctg}\theta_{\text{ср}})}+1\right]^{-\frac{1}{2}}\end{aligned}\right\}. \qquad (11.6)$$

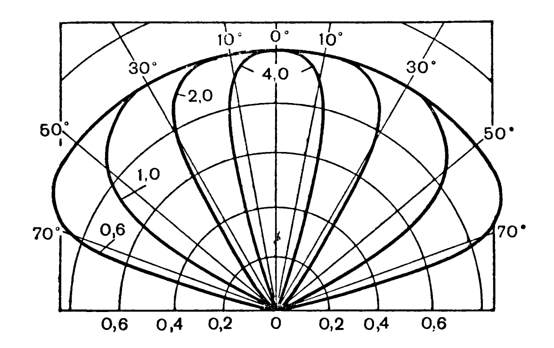


Рис. 11.11. Характеристики направленности микрофонов для неискаженной стереофонической передачи при y/l равном 0,6; 1,0; 2,0; 4,0

Кривые (рис. 11.11), построенные по формулам (11.6), показывают, что при увеличении расстояния $\frac{y}{l} = \operatorname{ctg}\theta$, характеристики $\Phi(\theta)$ должны суживаться по определенному закону. Характеристики современных микрофонов не отвечают этому закону, однако же использование тех из них, у которых можно дистанционно менять ширину характеристики, позволяет управлять панорамой и снижать локализационные искажения.

В заключение сформулируем несколько выводов.

1. Управление шириной стереопанорамы можно осуществить электрическим или акустическим методом, изменяя уровни сигналов в каналах или остроту характеристик направленности микрофонов.

2. Для передачи неменяющейся звуковой панорамы (оркестра, хора) управляющие регуляторы устанавливают в процессе репетиций.

3. Управление меняющейся панорамой проводят при наблюдении за движением источника на экране, разделенном по вертикали на части по числу позиций переключения регулятора соответствующей ему стереопары.

4. Регуляторами, построенными по кривым *1, 1′* и *2, 2′* (рис. 11.9), можно управлять панорамой при псевдостереофонических передачах.

11.10. Управление акустической обстановкой

Для более полной передачи акустической обстановки первичного помещения необходимо расширять угол приема КИЗ, создаваемых отраженными в нем сигналами. Для этого следует не только увеличить базу громкоговорителей, но и свести до минимума искажения фронтального типа, что связано с близким размещением микрофонов относительно исполнителей. Однако такая близость вызывает заметное уменьшение эквивалентного времени реверберации, что недопустимо. Поэтому микрофоны, предназначенные для приема реверберационного процесса, приходится относить на достаточно большое расстояние (4÷7 м) от первой линии исполнителей, а для уменьшения фронтальных искажений раздвигать их подальше друг от друга. Выбирая предельное расстояние между микрофонами, нужно помнить, что они должны находиться в диффузном звуковом поле, которое теряет свое свойство на расстоянии 2÷4 м от стен помещения.

В случае современной музыки стремятся не передавать акустическую обстановку первичного помещения, а пространственность привносить в звучание то одного, то другого инструмента или голоса. Поэтому исполнители размещаются очень близко к микрофонам, нужную же пространственность получают с помощью ревербераторов, включая их в каналы соответствующих источников звука.

Если каналов больше двух, микрофоны, как и громкоговорители, можно расположить так, чтобы угол приема отраженных сигналов в первичном и вторичном помещениях был возможно больше. В условиях широкоформатного кинематографа, например, это можно осуществить, отодвигая микрофоны двух крайних каналов от исполнителей в глубь ателье и вынося крайние громкоговорители системы воспроизведения на боковые стены кинозала.

Особое относительное размещение микрофонов — отличительная черта квадрафонических систем. В них четыре микрофона и соответствующие им громкоговорители располагаются по углам квадрата, ромба (рис. 11.7, *г* и *д*) или трапеции. При передаче классической музыки исполнители рассаживаются перед группой передних микрофонов. В случае работы по схеме «квадрат» микрофоны *1* и *2* принимают преимущественно пространственно звуковую информацию об оркестре, а микрофоны *3* и *4* — об акустической обстановке помещения. При размещении по схеме «ромб» роль микрофонов *2* и *3* меняется. Они вместе с микрофоном *1* воспринимают панораму оркестра, а с микрофоном *4* участвуют в создании акустической обстановки. В том и другом случае создаются условия восприятия, подобные условиям концертного зала, когда угол приема оркестра ограничен, а угол приема акустической обстановки первичного помещения соответствует 360°.

Таким образом, в квадрафонических системах получение максимального угла приема КИЗ, созданных отраженными сигналами, предусмотрено схемой размещения микрофонов и громкоговорителей. Однако окончательный эффект и в этом случае зависит от расстояния между исполнителями и удаленной парой микрофонов. Для то-

го чтобы они воспринимали диффузную энергию и время реверберации было оптимальным, это расстояние, как видно из рис. 8.10, должно быть не менее $4 \div 7$ м.

Пространственное размещение микрофонов и громкоговорителей, характерное для квадрафонических систем, позволяет не только передать акустическую обстановку первичного помещения, но и улучшает передачу других стереофонических признаков сигналов. При соответствующем размещении исполнителей относительно микрофонов улучшается прозрачность звучания и передача тембров естественных источников. Если иметь в виду еще и возможность совмещения квадрафонических записей, т. е. возможность одноканального звуковоспроизведения, то интерес, проявляемый к квадрафоническим системам, становится понятным.

По своим качественным показателям заслуживает внимания также и двухканальная система «искусственная голова» [10]. Однако сложности воспроизведения звука с фонограмм, полученных с ее помощью, вряд ли позволят применять эту систему в кинематографии.

11.11. О возможности получения одноканальной фонограммы со стереофонической

Для показа широкоэкранных фильмов на экранах нормальных размеров необходимо иметь фильмокопии с одноканальной фонограммой. Если первичная звукозапись была стереофонической по классу АВ, то такую фонограмму можно получить в процессе перезаписи несколькими способами: суммируя сигналы со всех каналов стереофонограммы, или поочередно включая сигналы, передаваемые то одним, то другим из ее каналов, или, наконец, перезаписывая сигнал только с одного, например, центрального канала. Одноканальная фонограмма может быть получена также и при непосредственной записи, выполняемой одновременно со стереофонической.

При первом способе сведения на одну фонограмму всех стереосигналов сложение их происходит в электрической цепи. В этом случае энергетическое суммирование, принятое при акустическом сложении, должно быть заменено суммированным с учетом фазовых сдвигов между сигналами, что меняет характер и величину появляющихся при этом искажений. Эти искажения могут быть выявлены в результате расчетов. Если исходный сигнал был синусоидальным, сложение стереосигналов в одном канале приводит к тому, что развиваемая в канале энергия будет выражаться как

$$E_c = ke_c^2 = k(e_1^2 + e_2^2 + \ldots + e_m^2) = \sum_{n=1}^{m} A_n \sin\omega\left(t - \frac{\Delta d_n}{c_0}\right), \quad (11.7)$$

где A_1; A_2; ... A_n — амплитуды отдельных канальных сигналов; $\Delta d_n = d_n - d_0$ — разность расстояний от источника звука до каждого из микрофонов (d_n) и до линии размещения последних (d_0).

Известно, что при сложении только трех сигналов, амплитуда

суммарного сигнала будет выражаться равенством

$$A_c^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + 2A_1A_2 \cos \omega \frac{\Delta d_1 - \Delta d_2}{c_0} +$$

$$+ 2A_2A_3 \cos \frac{\Delta d_2 - \Delta d_3}{c_0} + 2A_1A_3 \cos \frac{\Delta d_1 - \Delta d_3}{c_0}. \quad (11.8)$$

Подставляя в это равенство амплитуду каждого из сигналов, которые определяются из выражения (10.3) в виде

$$A_n = p_0 \Phi(\theta_n) \cos \theta_n, \quad (11.9)$$

можно найти уровень суммарного сигнала для этого случая:

$$N_c = 10 \lg \frac{A_c^2}{A_0}. \quad (11.10)$$

Судя по выражениям (11.8.) и (11.10.) изменения суммарного уровня сигнала будут вызываться как перемещением исполнителя относительно микрофонов в процессе звукозаписи (изменение θ_n), так и изменением частоты сигнала (ω). Поэтому для определения изменения суммарного уровня, обусловленного только первой из причин, расчеты проводились для фиксированной частоты, равной 1000 Гц. Суммарный уровень определялся при различных значениях $\frac{x'}{l'}$, изменяющихся за счет увеличения длины полубазы от 0,2 до 3 м.

Если провести расчеты на ряде различных частот исходного сигнала, можно определить зависимость изменения суммарного уровня не только от положения источника звука перед микрофонами, но и от частоты сигнала.

Результаты расчетов показывают, что рассматриваемый способ получения одноканальной фонограммы приводит к значительным колебаниям уровня суммарного сигнала даже тогда, когда он должен оставаться постоянным. Эти искажения в передаче уровня достигают 10—12 дБ. Помимо этого появляются значительные частотные искажения, доходящие до 12—15 дБ, причем форма частотной характеристики резко изменяется в зависимости от расстояния между микрофонами. Такие же изменения формы появляются и при изменении положения исполнителя $\left(\frac{x}{l} \text{ и } \frac{y}{l}\right)$ относительно линии микрофонов.

Используя выражения (10.29) и (10.30), можно получить формулу, показывающую как изменяется акустическое отношение R при рассматриваемом способе создания одноканальной фонограммы. Поделив второе выражение на первое, можно получить следующее равенство:

$$\frac{R_m}{R_1} = \frac{E_{\text{отр}_m}}{E_{\text{пр}_m}} \cdot \frac{E_{\text{пр}_1}}{E_{\text{отр}_1}} = \frac{m \, \Phi^2(\theta) \cos^2\theta}{\sum\limits_{n=1}^{m} \Phi^2(\theta_n) \cos^2 \theta_n}. \quad (11.11)$$

Расчеты по этой формуле позволяют представить как изменяется акустическое отношение при переходе от обычного способа получения одноканальной фонограммы к получению ее способом сведения. Как следует из этих расчетов, перемещение источника звука в процессе записи приводит к тому, что акустическое отношение все время изменяется, увеличиваясь в 15—20 раз, по сравнению с обычной одноканальной записью. Это должно приводить к заметному изменению акустической окраски звучания.

Таким образом, получение одноканальной фонограммы, путем перезаписи со стереофонической неизбежно влечет за собой значительные колебания суммарного уровня сигнала, появления частотных искажений и неоправданное увеличение акустического отношения, а следовательно, и эквивалентной реверберации. Вот почему этот способ не может быть рекомендован в случаях, когда качество звучания должно быть высоким.

Второй способ получения одноканальной фонограммы путем выборочной перезаписи сигналов то с одного, то с другого из каналов требует выполнения ряда переключений и регулировок уровней сигнала. Из рис. 10.8. видно, что переключение с канала на канал следует производить тогда, когда уровни в соседних каналах становятся одинаковыми. Это для двухканальной системы соответствует моменту, когда исполнитель располагается в центре системы (см. рис. 10.8) и $\frac{x}{l}=0$. Для трехканальной системы одинаковость уровней имеет место при $\frac{x}{l}$, равном $+0{,}5_n—0{,}5$. В первом случае регулировки уровней должны происходить в пределах до 10—15 дБ, а во втором — до 5—10 дБ.

Оценка третьего способа получения одноканальной фонограммы со стереофонической, связанного с перезаписью звука только с одного из каналов, может быть сделана по результатам рассмотрения кривых на рис. 10.8.

Если запись звука производилась при расстоянии $\frac{x}{l}=0{,}5$ (кривая *3*) и исполнитель двигался в пределах от $\frac{x}{l}=-1{,}0$ до $\frac{x}{l}=$ $=+1{,}0$, то при использовании только левого канала сигнал следует постепенно усиливать по закону обратной кривой *3*. При трехканальной фонограмме перезапись на один канал нужно вести с центрального канала, а сигнал следует сначала постепенно ослаблять по мере приближения значения $\frac{x}{l}$ к нулю, а потом также постепенно усиливать. В этом случае пределы регулировок уменьшаются примерно в двое.

Очевидно наиболее уверенные результаты дает непосредственная одноканальная запись звука, проводимая параллельно со стереофонической в процессе съемки широкоформатного фильма.

Не трудно заметить, что проблемы получения одноканальной фонограммы со стереофонической по системе *XY* или *MS* не суще-

ствует, так как наличие одинакового расстояния от каждого из микрофонов этих систем до исполнителя исключает фазовые сдвиги между сигналами, зафиксированных каждым из каналов. Это существенное преимущество системы *XY* и *MS* по сравнению с системой *AB*.

Таким образом можно утверждать, что:

а) способ сведения стереосигналов, записанных по системе AB, на одну фонограмму, являясь самым простым, не может обеспечить хороших результатов;

б) способы поочередной перезаписи с каждого канала этой системы или только с одного из них дают удовлетворительные результаты, однако, они требуют тщательного проведения переключений и регулировок;

в) наилучшим решением является одновременное со стереофонической проведение одноканальной записи звука;

г) при наличии фонограммы, полученной по системам *XY* и *MS*, одноканальную фонограмму можно получить способом сведения стереосигналов.

11.12. Обеспечение звукового контроля при проведении стереофонических передач

Управление стереофоническими передачами выполняется звукорежиссером в процессе прослушивания их в аппаратной, как правило, с помощью системы громкоговорителей. Такой метод управления требует тщательного звукового контроля, который зависит от условий его проведения. Очевидно эти условия должны быть оптимальными. Данное требование относится как к качеству звуковоспроизводящей системы, так и к помещению аппаратной и размещению громкоговорителей.

Установлено, что необходимые акустические условия могут быть созданы в том случае, если внутренний объем аппаратной не меньше 150—200 м^3, а соотношение ее размеров выбраны таким образом, чтобы первые собственные частоты появлялись в пределах нижних передаваемых трактом частотных полос. При этом в каждой следующей из третьоктавных полос число их должно монотонно увеличиваться. Время реверберации в аппаратной следует выбирать равным 0,25—0,4 с при частотной характеристике близкой к прямолинейной.

Для системы контроля, состоящей обычно из двух громкоговорителей, разнесенных на некоторое расстояние, важным является правильный выбор этих расстояний (базы звуковопроизведения) и положения слушателя относительно источников звука. Это важно потому, что как в том, так и в другом случае происходит изменение масштаба пространственной панорамы, что влияет на качество контроля. При малой базе элементы этой панорамы кажутся очень мелкими, а при большом удалении слушателя от базы происходит еще и не естественное сокращение общей ширины панорамы. Вместе с этим удаление слушателя, благодаря воздействию реверберации,

хорошо обнаруживается на слух и изменяет впечатление о звуковом плане передачи. Таким образом, зона оптимального восприятия, обусловливающая успешный контроль, действительно зависит от ширины базы и положения слушателя относительно ее.

Оптимальная ширина базы может быть определена, исходя из допустимых пространственных искажений, для случая, когда КИЗ занимает среднее положение между громкоговорителями, где эти искажения делаются наибольшими. Имея в виду, что точность локализации в центре панорамы падает очень заметно, изменение положения КИЗ на величину $\frac{x'}{l'}=0{,}1$ можно считать допустимым. Это тем более справедливо в случае, если стереозвучание связано с изображением на экране, когда осуществляется зрительная коррекция положения КИЗ. Кроме того, экспериментально было показано, что предпочтительность для слушателей растет по мере увеличения ширины базы и особенно быстро при увеличении ее до значения $2l'=2\div3$ м. Однако нужно помнить, что при значительных размерах базы, ширина зоны стереовоспроизведения невелика, а потому звукорежиссер должен размещаться на осевой линии системы громкоговорителей.

Наиболее оправданное удаление слушателя от базы можно найти, исходя из разрешающей способности слуха, она в угловой мере составляет 4°. Если считать, что в пределах базы слушатель четко может определить пять направлений на КИЗ, это означает, что угол, составленный им и направлениями на громкоговорители, должен быть равным 20°. Это при известной ширине базы $2l'$ позволяет найти максимальное его удаление — $\frac{y''}{l'}$. Минимальное же удаление, как считают многие исследователи, должно соответствовать углу не превышающему 90°. Таким образом, допустимые расстояния от слушателя до базы должны лежать в пределах $20°\leqslant2\varphi\leqslant90°$.

При найденном выше значении оптимальной ширины базы и указанных предельных изменениях угла φ можно определить и предельные расстояния от базы до точки размещения слушателя на оси системы, соответствующие выбранной ширине самой базы. Это расстояние, как показывают расчеты, при $2l'=2$ м будет находиться в пределах от 1 м до 5,5 м, а при $2l'=3$ м — в пределах от 1,5 до 8 м. Как следует из приведенных данных, размеры аппаратных звукорежиссера позволяют реализовать на практике получение базы воспроизводящей системы нужной величины и обеспечивают возможность размещения звукорежиссера на расстояниях соответствующих минимальным и даже средним (3—4 м) из предельных их значений.

Следует отметить, что многие исследователи говорят о зависимости оптимальной ширины базы от характера передаваемого звучания, а некоторые из них указывают и на конкретную ее величину. Так, например считают, что при передаче симфонической музыки она должна быть примерно 3 м, а для эстрадной музыки и речи — равной 2 м.

Особенности работы микрофонов-приемников градиента давления

Выше отмечалось, что принцип действия градиентного микрофона известным образом предопределяет условия его работы. Использование макрофона в пределах ближней зоны на малых расстояниях от источника звука приводит к появлению искажений в области низких частот.

Чтобы определить границы влияния этой зоны, решить вопрос об оптимальных условиях применения такого микрофона, необходимо найти силу, действующую на его подвижную систему при большом (в поле плоской звуковой волны) и малом расстоянии (в поле шаровой волны) от исполнителя.

В первом случае эта сила

$$F_1 = (p - p')S, \tag{2.1}$$

где p и p' — звуковые давления, действующие на переднюю и тыльную сторону подвижной системы, и S — площадь этой системы.

Считая сигнал, действующий на микрофон, синусоидальным, а расстояние между передней и тыльной стороной системы $S = d\cos\theta$, эти звуковые давления можно выразить в виде

$$p = p_m \sin\omega t$$

и

$$p' = p_m \sin\omega\left(t - \frac{\delta}{c_0}\right) = p_m \sin\omega\left(t - \frac{d\cos\theta}{c_0}\right).$$

После подстановки этих значений в равенство (6.11), его можно переписать в виде

$$F_1 = P_m S\left[\sin\omega t - \sin\omega\left(t - \frac{d\cos\theta}{c_0}\right)\right],$$

или после соответствующей замены разности синусов в виде

$$F_1 = 2p_m S \sin\frac{\omega d\cos\theta}{2c_0}\cos\omega\left(t - \frac{d\cos\theta}{2c_0}\right). \tag{2.2}$$

Отсюда амплитуда действующей силы определится как

$$F_{m_1} = 2p_m S\sin\frac{\omega d\cos\theta}{2c_0}$$

или, так как $d \ll \lambda$, то, заменяя синус угла значением самого угла, можно написать, что

$$F_{m_1} = 2p_m S\frac{\omega}{2c_0}d\cos\theta. \tag{2.3}$$

Если источник звука считать точечным и расположить его на столь малом расстоянии r от микрофона, что подвижная его система окажется в поле шаровой волны, сила, действующая на эту систему, выразится уже в виде

$$F_2 \operatorname{grad} p = -\frac{\partial p}{\partial r} Sd\cos\theta, \tag{2.4}$$

а звуковое давление в виде

$$p = p_m \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c_0} r\right) = \frac{c_0}{r} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c_0} r\right). \tag{2.5}$$

После дифференцирования последнего выражения можно получить

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{c_0}{r} \cdot \frac{\omega}{c_0} \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{c_0} r\right) + \frac{c_0}{r^2} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c_0} r\right) =$$

$$= \frac{c_0}{r} \cdot \frac{\omega}{c_0} \left[\cos\left(\omega t - \frac{\omega}{c_0} r\right) - \frac{c_0}{\omega r} \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{c_0} r\right)\right]. \tag{2.6}$$

Производя замену коэффициентов перед слагаемыми, заключенными в квадратные скобки, так, чтобы

$$1 = A^2 \sin^2 \varphi, \ a \ \left(\frac{c_0}{\omega r}\right)^2 = A^2 \cos^2 \varphi$$

и, находя отсюда

$$A = \sqrt{1 + \left(\frac{c_0}{\omega r}\right)^2},$$

можно выражение (6.16) представить, как косинус разности двух углов $\left(\omega t - \frac{\omega z}{c_0}\right)$ и φ, т. е. в виде

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{\omega}{c_0} p_m \sqrt{1 + \left(\frac{c_0}{\omega r}\right)^2} \cos\left(\omega t - \frac{\omega r}{c_0} - \varphi\right). \tag{2.7}$$

После подстановки (6.16) в (6.14) выражение действующей силы, для микрофона, находящегося в поле шаровой волны, принимает вид

$$F_2 = \frac{\omega}{c_0} p_m \sqrt{1 + \left(\frac{c_0}{\omega r}\right)^2} Sd\cos\theta \cos\left(\omega t - \frac{\omega r}{c_0} - \varphi\right), \tag{2.8}$$

а выражение для амплитуды этой силы — вид

$$F_{m_2} = \frac{\omega}{c_0} p_m \sqrt{1 + \left(\frac{c_0}{\omega r}\right)^2} Sd\cos\theta. \tag{2.9}$$

Взяв отношение величин, выраженных равенствами (6.13) и (6.19), можно установить, что силы, действующие на подвижную систему градиентного микрофона при его нахождении в поле плоской и по-

ле шаровой волны, отличаются друг от друга множителем

$$\frac{F_{m_1}}{F_{m_2}} = \sqrt{1 + \frac{c_0^2}{\omega^2 r^2}}\,. \qquad (2.10)$$

Как видно из равенства (1.10), этот множитель зависит от частоты сигнала и расстояния r между источником звука и микрофоном. Если по формуле (1.10) выполнить расчеты при разных значениях ω и r, то по ним можно установить ряд практически важных выводов.

1. Микрофоны — приемники градиента давления вносят в передачу частотные искажения, увеличивающиеся при приближении к ним источников звука.

2. Эти искажения быстро растут вместе с понижением частоты сигнала.

3. Данные микрофоны, считая искажения допустимыми при условии, что на частоте 50 Гц они будут не больше 6 дБ, можно использовать без коррекции на расстояниях не меньше 0,8—1 м. Для использования на более близких расстояниях до 0,5—0,3 м необходима электрическая коррекция, достигающая на указанной частоте 6—12 дБ.

Очевидно, свойством подчеркивания низких частот микрофонами — приемниками градиента давления можно воспользоваться в том случае, если такое подчеркивание повышает качество звучания или создает нужный звуковой эффект.

Основные параметры некоторых высококачественных микрофонов

Тип и марка микрофона	Диапазон частот, Гц	Неравномерность ЧХ, дБ	Чувствительность на 1000 Гц, мВ.Па$^{-1}$	Разность чувств. фронт—тыл, дБ	Вид харак. направл.	Размеры, мм	Масса, г
Катушечные							
МД-74	50—10 000	—	1,2	—	Ос	810×71	500
МД-77	100—10 000	—	2,2	12	О	⌀37×83	180
МД-81	50—12 000	—	2,5	—	Ос	⌀50×17	600
МД-81А	50—12 000	—	50	—	Ос	⌀44×206	700
МД-82	50—16 000	6	1,3	15	О	⌀37+177	200
МД-84	50—16 000	Изм.	1,5	—	Ст	⌀40×180	300
МД-300-1	50—14 000	8	3,0	15	О	⌀46×175	300
Д224Е АКG	20—20 000	—	1,3	—	Н, О, Д	⌀23×195	280
Д202Е1 АКG	20—20 000	—	1,6	—	Н, О, Д	⌀52×218	320
Ленточные							
МЛ-16	50—15 000	—	0,6	—	Д	⌀54×225	1500
МЛ-19	70—10 000	10	1,0	12	О	40×45×135	500
МЛ-20	80—10 000	—	0,1	—	Д	50×90×180	200
Конденсаторные							
МК-17	50—16 000	Изм.	22	15	О	51×172	260
МК-18	50—16 000	—	16	—	Н, О, Д	46×35×187	400
МК-19	50—16 000	6	14	15	О	46×35×180	300
МКЭ-6	50—16 000	6	3,5	18	О	48×195	140
МКЭ-10	50—16 000	6	2,0	—	Н	21×150	120
МКЭ-11СН	50—16 000	—	2,5	15	Ст	48×160	270
С535ЕВ (АКG)	20—20 000	Изм.	9	15	О	45×183	300
С414Е1 (АКG)	20—20 000	—	6		Н, О, Д	45×35×142	290
U-87i (Нейман)	40—16 000	—	8		Н, О, Д	⌀56×200	500
U89	40—18 000		8		Н, О, Д	⌀46×185	400
UM-58 (ГДР)	30—18 000		15		Н, О, Д	⌀42×190	360

Примечание. В графе «Неравномерность ЧХ» «Изм.» — означает «с изменяемой частотной характеристикой».В графе «Вид харак. направл.» 6 Н, О, Д, Ос, Ст — соответственно означает: ненаправленный, одно-двухсторонненаправленный, остронаправленный и стереофонический.

Примерные значения коэффициента изменения звукового плана для различных музыкальных инструментов и групп

Музыкальные инструменты группы и ансамбли	Ближний (крупный) план	Естественный (средний) план	Удаленный (мелкий) план
Фортепиано	12 (джаз)	1	0,4
Скрипка	10	1	0,6
Виолончель	12	1	0,6
Контрабас	50 (джаз)	0,5	0,3
Деревянные инструменты	10 (джаз)	1	0,8
Медные инструменты	8 (джаз)	0,5	0,1
Ударные инструменты	50 (джаз)	0,5	0,08
Симфонический ансамбль	1	0,3	0,08
Субъективное впечатление	Интимность звучания, изменения тембра и четкости, подчеркивание пауз и индивидуальных особенностей голоса.	Нормальные размеры источника, привычная тембральная окраска звучания и акустическая атмосфера.	Малые размеры источника звука, пространственность звучания, восприятие размеров помещения.

Примечания. 1. Коэффициент изменения звукового плана [1] по существу обратен акустическому отношению и представляется в виде:

$$G = \frac{13,8V}{4\pi c_0 d^2 T \Phi(\theta)} .$$

2. Большие значения коэффициента G, приведенные в графе «Ближний план» для джазовой музыки, указывают на использование в ней сверхблизких планов.

Приложение 4.

Расстояния от источника звука до микрофона при различных звуковых планах в помещениях, отличающихся по объему и времени реверберации

Объем (м³) Время реверберации (с)		100 0,8	200 0,9	500 1,0	1000 1,3	2000 1,5	5000 1,7	10 000 1,8
Фортепиано	Крупный план	0,15	0,25	0,35	0,45	0,6	0,9	1,45
	Средний план	0,6	0,9	1,3	1,6	2,1	3,0	4,2
	Мелкий план	1,0	1,4	2,1	2,5	3,3	4,7	6,7

Объем (м³) Время реверберации (с)		100 0,8	200 0,9	500 1,0	1000 1,3	2000 1,5	5000 1,7	10 000 1,8
Деревянные инструменты	Крупный план	0,2	0,3	0,4	0,5	0,65	0,95	1,4
	Средний план	0,6	0,9	1,3	1,6	2,1	3,0	4,2
	Мелкий план	0,8	1,1	1,6	1,9	2,6	3,5	4,9
Медные инструменты	Крупный план	0,25	0,35	0,45	0,55	0,7	1,05	1,5
	Средний план	0,9	1,2	1,8	2,2	2,9	4,4	6,3
	Мелкий план	2,0	2,7	4,1	4,8	6,7	9,9	13,7
Симфонический оркестр	Крупный план	0,6	0,9	1,3	1,6	2,1	3,0	4,2
	Средний план	1,1	1,6	2,3	2,7	3,7	5,7	7,4
	Мелкий план	3,5	5,1	7,2	8,5	11,5	16,5	23,5

Примечания. 1. Звуковые планы передаются тем более заметно, чем больше время реверберации помещения.

2. Необходимые эффекты пространственности и удаленности не удается получить в помещениях малых объемов.

3. В помещениях малых объемов создание крупного и сверхкрупного плана требует таких малых расстояний, при которых появляются заметные на слух искажения (см. рис. 6.9—6.11).

4. Установление при передаче оркестровых звучаний нужного звукового плана или акустического баланса может быть связано с нарушением баланса звукового.

5. Звучания кларнета, трубы, тромбона и других медных инструментов при крупном плане передаются более ярко, особенно в низком регистре.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Аллон С. М., Максимов Н. И.* Музыкальная акустика. М., «Высшая школа», 1971.
2. *Бернар Ж.* Руководство по записи звука. М., Изд-во Гос. комитета по радиовещанию и телевидению, 1962.
3. *Блауэрт И.* Пространственный звук. М., «Энергия», 1979.
4. *Бондарко Л. В.* Звуковой строй современного русского языка. М., «Просвещение», 1977.
5. *Вахитов Я. Ш., Маньковский В. С.* Искажения в передаче движения источника звука при стереофоническом воспроизведении. — «Акуст. журн. АН СССР», т. III, вып. 2, 1957.
6. Вопросы киноискусства. Сборник. М., Изд-во АН СССР, 1958.
7. *Георгиев Е.* Музыкальная акустика. София, «Искусство», 1975.
8. *Дрейзен И. Г.* Электроакустика и звуковое вещание. М., Связьиздат, 1961.
9. *Закревский Ю.* Звуковой образ в фильме. М., «Искусство», 1970.
10. Избранные сценарии советского кино. М., Госкиноиздат, 1949.
11. Исследование заметности искажений в радиовещательных каналах. Под ред. И. Е. Горона. М., Связьиздат, 1959.
12. *Качерович А. Н.* Акустическое оборудование киностудий и театров. М., «Искусство», 1980.
13. *Ковалгин Ю. А., Борисенко А. В., Гензель Г. С.* Акустические основы стереофонии. М., «Связь», 1978.
14. *Козюренко Ю. И.* Основы звукорежиссуры в театре. М., «Искусство», 1975.
15. *Маньковский В. С.* Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. М., «Искусство», 1966.
16. *Маньковский В. С.* О локализации кажущегося источника звука при двухканальной стереофонической передаче. — «Акуст. журн. АН СССР», т. V, вып. 2, 1959.
17. *Маньковский В. С.* Акустические особенности первичных помещений, предназначенных для стереофонических передач.—«Труды ЛИКИ», вып. 7, 1961.
18. *Маньковский В. С.* Коррекция искажений локализации при стереофонической записи движущегося источника звука. — «ТКиТ», 1962, № 11.
19. *Маньковский В. С.* Искажения в передаче фронтального движения звукового объекта при использовании стереомикрофонов. — «ТКиТ», 1963, № 11.
20. *Маньковский В. С.* Применение корреляционного метода изучения локализационных искажений, обусловленных работой стереофонической системы. — «Акуст. журн. АН СССР», т. XV, вып. 2, 1969.
21. *Маньковский В. С.* Влияние зрительного восприятия на слуховую локализацию источника звука. — «Вопр. психологии», 1969, № 4.
22. *Маньковский В. С., Левичев А. А. и др.* Зависимость положения кажущегося источника звука в двухканальной стереосистеме от восприятия его изображения. — «ТКиТ», 1969, № 10.
23. *Маньковский В. С.* Влияние размещения источника звука относительно микрофонов стереосистемы на передачу акустической обстановки помещения.— «Труды ЛИКИ», вып. XXVIII, 1976.
24. *Нисбетт А.* Звуковая студия. М., «Связь», 1979.
25. *Покровский Н. Б.* Расчет и измерение разборчивости речи. М., Связьиздат, 1962.
26. Проблемы сценической речи. Под ред. С. В. Гиппиус, А. Н. Куницына. Л., 1979.
27. *Римский-Корсаков А. В.* Электроакустика. М., «Связь», 1973.
28. *Рязанов Э.* Грустное лицо комедии. М., «Мол. гвардия», 1977.

29. *Сапожков М. А.* Электроакустика. М., «Связь», 1978.
30. *Соловьева А. И.* Основы психологии слуха. Л., Изд-во ЛГУ, 1972.
31. *Станиславский К. С.* Собр. соч., М., «Искусство», 1954.
32. Сценическая речь. Под ред. И. П. Козляниновой. М., «Просвещение», 1976.
33. «Труды ВНИИТР», № 2(21). М., 1972.
34. *Франк Г. Я.* Шесть бесед о звуке. М., «Искусство», 1971.
35. *Фрид Э. Л.* Музыка советского кино. Л., «Музыка», 1967.
36. *Фурдуев В. В.* Акустические основы вещания. М., «Связь», 1960.
37. *Цвикер Э., Фельдкеллер Р.* Ухо как приемник информации. М., «Связь», 1971.
38. *Элкин Е. Г.* Звук и изображение. М., «Связь», 1978.
39. *Эйзенштейн С.* Избр. произв., т. 3. М., «Искусство», 1952.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора 3

Глава 1. Общие вопросы звукопередачи

1.1. Роль звука в кино, телевидении и радиовещании 5
1.2. Функции звукорежиссера (звукооператора) 6
1.3. Звуковое решение фильма в разработке автора, режиссера и звукорежиссера 9
1.4. Обеспечение процесса записи и передачи звука 10
1.5. Факторы, определяющие качество звукопередач 11

Глава 2. Акустические характеристики натуральных источников звука

2.1. Общие характеристики натуральных звучаний 13
2.2. Особенности речевых звучаний 14
2.3. Акустические характеристики струнных музыкальных инструментов 18
2.4. Акустические характеристики духовых музыкальных инструментов 23
2.5. Акустические характеристики ударных музыкальных инструментов и шумовых источников 28
2.6. Акустические характеристики оркестров и музыкальных ансамблей 31

Глава 3. Особенности художественной передачи звучаний

3.1. Роль звукорежиссера в создании художественной передачи 33
3.2. Акустические характеристики художественной речи 34
3.3. Внутренняя и внешняя речевая техника 35
3.4. Основные элементы речевой выразительности 37
3.5. Стилевые особенности речи 39
3.6. Выразительные средства одноголосной музыки 41
3.7. Мелодия, гармония и полифония 43
3.8. Функции музыки в кино и на телевидении 46
3.9. Роль шумов в художественных фильмах и программах . . . 48
3.10. Значение технических средств в передаче художественных звучаний 50

Глава 4. Слуховое восприятие и его связь с акустическими характеристиками сигналов

4.1. Восприятие интенсивности сигналов 52
4.2. Восприятие частоты сигнала 56
4.3. Временные характеристики слухового восприятия 59
4.4. Пространственное восприятие сигналов 61

Глава 5. Влияние электроакустических характеристик передающей системы на качество звукопередачи

5.1. Влияние изменений уровня громкости 66
5.2. Влияние ограничения динамического диапазона передачи . . 68
5.3. Заметность ограничения частотного диапазона при передаче речи и пения 70
5.4. Заметность ограничения частотного диапазона при передаче инструментальной музыки 73
5.5. Влияние крутизны подъема и спада частотной характеристики на ее краях 76
5.6. Заметность искажений, обусловленных пиками и провалами на частотной характеристике звукопередачи 78
5.7. Заметность нелинейных искажений 81

Глава 6. Выбор электроакустической аппаратуры и условий ее работы

6.1. Общая характеристика звукопередающих систем 85
6.2. Требования, предъявляемые к монофоническим системам передачи 86
6.3. Определение числа каналов, используемых при монофонических передачах 88
6.4. Условия применения группы микрофонов 91
6.5. Сравнительная оценка микрофонов, применяемых для звукопередач 94
6.6. Выбор микрофонов для речевых передач 98
6.7. Выбор микрофонов для музыкальных передач 101
6.8. Общие рекомендации по выбору расстояния между микрофоном и источником звука 104
6.9. Влияние вида звуковой информации на выбор расстояния между источником звука и микрофоном 106
6.10. Размещение микрофонов при записи или передаче речевых сигналов 109
6.11. Размещение микрофонов при передаче музыкальных сигналов 111

Глава 7. Оперативное управление звуковыми сигналами в процессе их передачи, записи и перезаписи

7.1. Управление уровнями сигналов при их записи или передаче 116
7.2. Управление уровнями сигналов в процессе перезаписи звука 118
7.3. Ручное управление динамикой передаваемых звучаний . . . 119
7.4. Автоматическое управление динамическим диапазоном . . . 121
7.5. Управление шириной частотного диапазона 126
7.6. Управление формой частотной характеристики на ее краях 127
7.7. Управление частотной характеристикой в ее центральной области 130

Глава 8. Выбор помещения для звукопередачи и методы управления его акустическими параметрами

8.1. Факторы, определяющие акустические условия передач . . . 134
8.2. Связь субъективного восприятия звучания с объективными акустическими параметрами помещения 135
8.3. Выбор ателье для речевых передач 137
8.4. Выбор ателье для музыкальных передач 140
8.5. Методы управления акустическими условиями в помещении 143
8.6. Управление временем реверберации путем изменения расстояния между исполнителем и микрофоном 144
8.7. Управление временем реверберации с помощью микрофонов переменной направленности 146
8.8. Управление временем реверберации с помощью специального размещения звукопоглощающего материала 149
8.9. Управление временем реверберации при помощи переменного звукопоглощения 152
8.10. Управление временем реверберации с использованием системы акустической обратной связи 153
8.11. Субъективная оценка влияния акустики помещения на качество звукопередачи 154
8.12. Об управлении временем прихода первых отражений . . . 156

Глава 9. Искусственные методы управления акустикой студий и их применение

9.1. Классификация систем искусственной реверберации . . . 159
9.2. Общие свойства систем искусственной реверберации 160
9.3. Гулкие камеры 163
9.4. Листовые ревербераторы 165
9.5. Пружинные ревербераторы 168

9.6. Магнитные ревербераторы 170
9.7. Амбиофоническая система 173
9.8. Электронные ревербераторы 174
9.9. Сравнительная оценка качества искусственной реверберации, получаемой различными методами 175
9.10. Рекомендации по использованию ревербераторов 178

Глава 10. Анализ стереофонических систем и условий их применения

10.1. Принципиальные основы стереофонии 181
10.2. Классификация стереофонических систем 183
10.3. Искажения в передаче движения кажущегося источника звука по глубине 186
10.4. Искажения в передаче движения кажущегося источника звука по фронту 191
10.5. Стереофоническая передача реверберационного процесса . . 196
10.6. Акустические условия в первичных помещениях, предназначенных для стереофонических передач 199
10.7. Зрительная коррекция локализационных искажений при кинопоказе 202
10.8. Разделимость сигналов и тембр звучания при стереопередачах 205

Глава 11. Выбор стереофонической системы и методы обработки стереосигналов

11.1. Общие замечания по обработке стереофонических сигналов 208
11.2. Выбор стереофонической системы 209
11.3. Выбор ателье для стереофонических передач 211
11.4. Размещение исполнителей при стереофонических передачах 212
11.5. Определение расстояния от исполнителя до линии микрофонов при стереопередачах 214
11.6. Общие рекомендации по размещению микрофонов при стереопередачах 217
11.7. Некоторые схемы размещения микрофонов при речевых стереофонических передачах 219
11.8. Управление звуковым балансом при стереофонии 220
11.9. Возможности управления шириной стереопанорамы 220
11.10. Управление акустической обстановкой 224
11.11. О возможности получения одноканальной фонограммы со стереофонической 225
11.12. Обеспечение звукового контроля при проведении стереофонических передач 228
Приложения 230

Дополнительная литература 236

Виктор Степанович Маньковский

ОСНОВЫ ЗВУКООПЕРАТОРСКОЙ РАБОТЫ

Редактор Н. Н. Жердецкая. Художник Ю. Г. Штелле. Художественный редактор М. Г. Егиазарова. Технический редактор А. Н. Ханина. Корректор З. П. Соколова.

И.Б. № 2043

Сдано в набор 28.02.84. Подписано в печать 03.12.84. А 14806. Формат издания 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 3. Гарнитура обыкновенная новая. Высокая печать. Усл. печ. л. 15. Усл. кр.-отт. 15. Уч.-изд. л. 15,923. Изд. № 16748. Тираж 6000. Заказ 189. Цена 85 коп. Издательство «Искусство», 103009 Москва, Собиновский пер., 3. Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

В.С. МАНЬКОВСКИЙ

ОСНОВЫ ЗВУКООПЕРАТОРСКОЙ РАБОТЫ